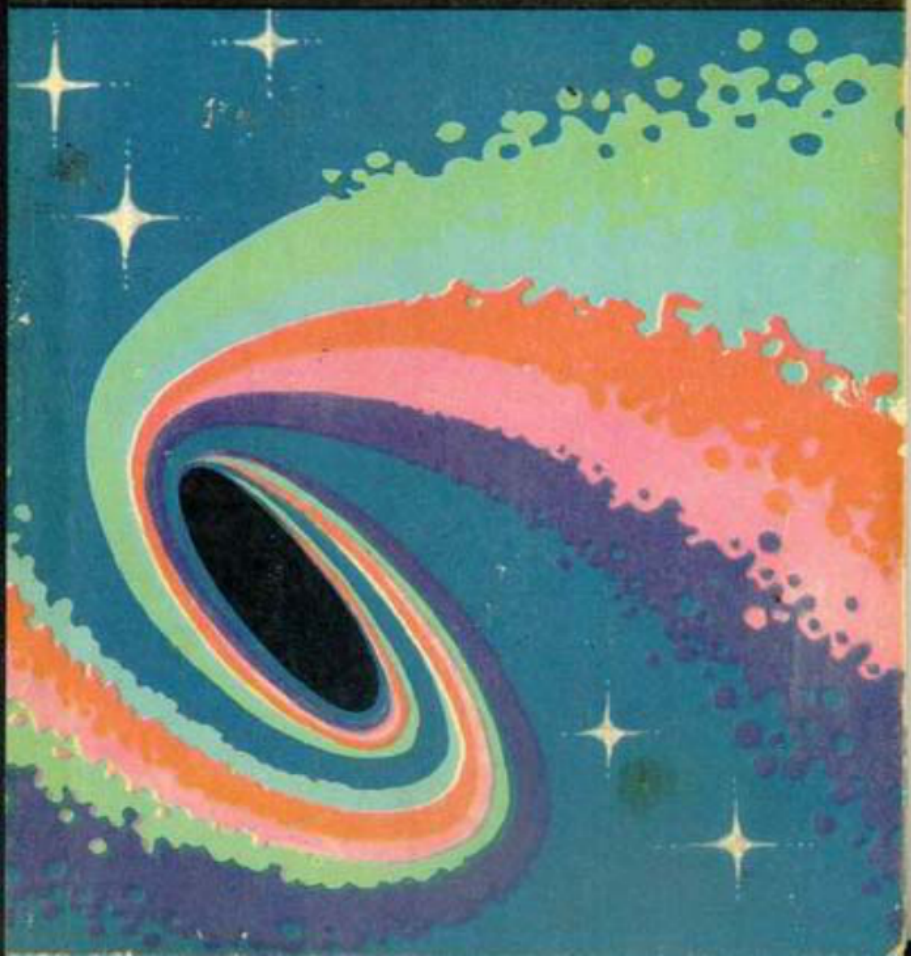
Эврика

И. Новиков

Черные дыры и Вселенная



И. Новиков Черные дыры и Вселенная

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

В книге говорится о совершенно необычных небесных телах открытых учеными в последние десятилетия, о черных дырах, о рождении галактик и туманностей, об отдельных особенностях развивающейся Вселенной.

- Введение
- Часть I.
  -
  - Глава I.
    - Невидимые миру звезды
    - Гравитационный радиус
    - Предсказание
  - Глава II.
    -
    - Дыра во времени
    - Небесная механика черных дыр
    - Черные дыры и свет
    - «Черные дыры не имеют волос»
    - Гравитационный вихрь вокруг черной дыры
  - Глава III.
    - Бездонные черные дыры
    - Гравитационная бомба
    - За краем гравитационной бездны
    - Нет ничего проще и сложнее, чем черные дыры
  - Глава IV.
    -
    - Они должны существовать
    - Как искать черные дыры?
    - Черные дыры открыты?
    - Гигантские черные дыры
  - Глава V.
    -
    - Пустая ли пустота?
    - Открытие Хоукинга
    - Черные дыры взрываются!
- Часть II.
  -
  - Глава I.
    - Мир, в котором мы живем
    - «Мерные масштабы» и другие инструменты астрономов

        - Вселенная должна эволюционировать
        - Открытие расширения вселенной
        - Расширяется ли вселенная?
    - Глава II.
        -
        - Вселенная в прошлом
        - Гравитация пустоты
        - Будущее расширяющейся вселенной
        - Проблема скрытой массы
        - Кривое пространство
        - Горизонт
    - Глава III.
        -
        - Физика начала расширения
        - Холодное или горячее начало?
        - Как было открыто реликтовое излучение
        - Почему реликтовое излучение не открыли раньше?
        - Путешествие в далекое прошлое
        - Первые пять минут
        - Сколько гелия в природе?
        - Триста тысяч лет эры фотонной плазмы и наша эра
    - Глава IV.
        - Нейтрино
        - Свойства вселенной
        - Нерешенные проблемы
        - Нейтрино во вселенной
        - Нейтринный эксперимент
        - Нейтринная вселенная
        - Происхождение галактик
        - Реальность и фантастика
    - Глава V.
        - Почему вселенная такая?
        - На крыльях времени
- Заключение

Введение

В этой книге рассказывается об открытиях в астрофизике последнего времени — о черных дырах, о начале расширения Вселенной и о том, что ее ждет в будущем.

Каждый читатель, конечно, слышал или читал о черных дырах. О них часто говорят в передачах по телевидению, по радио, пишут в газетах, в журналах и книгах разного жанра — от научных монографий до художественной и даже детской литературы. Откуда такая популярность?

Дело в том, что черные дыры — объекты совершенно фантастические по своим свойствам. «Из всех измышлений человеческого ума, от единорогов и химер до водородной бомбы, наверное, самое фантастическое — это образ черный дыры, отделенной от остального пространства определенной границей, которую ничто не может пересечь; дыры, обладающей настолько сильным гравитационным полем, что даже свет задерживается его мертвой хваткой; дыры, искривляющей пространство и тормозящей время. Подобно единорогам и химерам, черная дыра кажется более уместной в фантастических романах или в мифах древности, чем в реальной Вселенной. И тем не менее законы современной физики фактически требуют, чтобы черные дыры существовали. Возможно, только наша Галактика содержит миллионы их» — так сказал о черных дырах американский физик К. Торн.

К этому следует добавить, что внутри черной дыры

удивительным образом меняются свойства пространства и времени, закручивающихся в своеобразную воронку, а в глубине находится граница, за которой время и пространство распадаются на кванты... Внутри черной дыры, за краем этой своеобразной гравитационной бездны, откуда нет выхода, текут удивительные физические процессы, проявляются новые законы природы.

Черные дыры являются самыми грандиозными источниками энергии во Вселенной. Мы, вероятно, наблюдаем их в далеких квазарах, во взрывающихся ядрах галактик.

Они возникают также после смерти больших звезд. Возможно, черные дыры в будущем станут источниками энергии для человечества.

Замечательные открытия были сделаны астрофизиками при изучении «Большого взрыва» — так называют наблюдаемое расширение всей Вселенной. Когда и почему началось расширение Вселенной? Что происходило сразу после начала расширения? Как и почему во Вселенной появилось вещество? Почему образовались галактики? Бесконечна ли Вселенная? Что ждет Вселенную в далеком будущем? — об этом говорится в предлагаемой книге.

Возникает вопрос: почему мы рассказываем о черных дырах и о Вселенной в целом в одной книжке? Что у них общего, что их объединяет? Ответ можно сформулировать очень кратко — с точки зрения физики, общим является сверхсильное поле тяготения. И черные дыры, и Вселенная в целом в современной науке исследуются релятивистской астрофизикой — ветвью астрофизики, занимающейся изучением процессов, где гравитационные поля столь сильны, что разгоняют движущиеся в них тела до скоростей, близких к скорости света, то есть до максимально возможных в природе скоростей. Ни в каких других объектах поля тяготения не достигают таких больших величин. Но есть и другая общая черта, свойственная и черным дырам, и Вселенной, — это их таинственность, загадочность, необычность. Свойства их кардинально отличаются не только от свойств предметов, окружающих нас в обыденной жизни, но и от свойств многих физических объектов и небесных тел, которые часто тоже далеко не тривиальны.

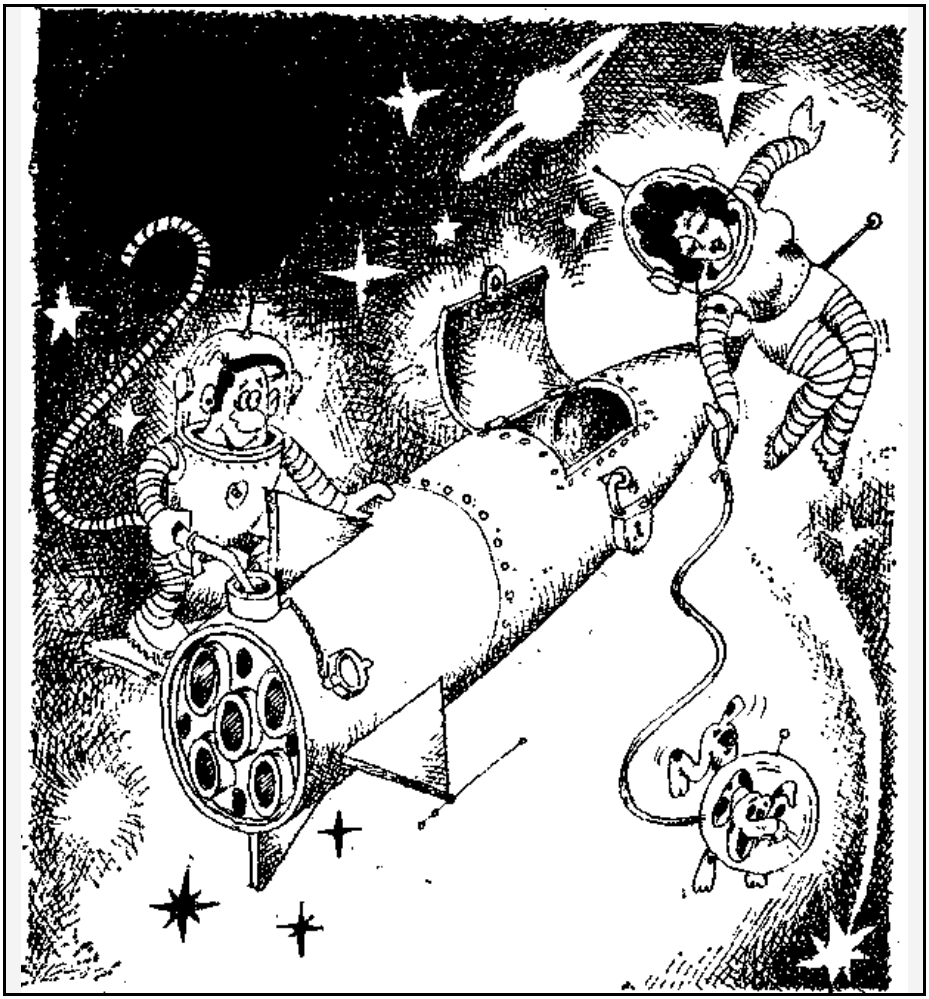
Чем таинственней загадка, чем глубже проблема, тем больший интерес она вызывает и у специалистов, и у всех интересующихся наукой. А. Эйнштейн, создатель общей теории относительности, писал: «Самое прекрасное и глубокое переживание, выпадающее на долю человека, — это ощущение таинственности». А у черных дыр и у Вселенной вряд ли найдутся конкуренты по части их загадочности.

Наконец, есть еще одно немаловажное обстоятельство, побуждающее нас рассказывать об этих проблемах вместе. Известно, что Вселенная расширяется. В далеком прошлом плотность материи во Вселенной была колоссальной. Невообразимо огромны были энергии частиц, силы их взаимодействия. В таких условиях проявлялись совершенно новые законы природы, кардинально менялись свойства даже пространства и времени. Такое состояние получило название сингулярного состояния. Как уже сказано, оно было во Вселенной в прошлом. С другой стороны, внутри черной дыры также неизбежно возникает сингулярное состояние. Поэтому иногда черную дыру называют лабораторией, в которой в миниатюре моделируется прошлое нашей Вселенной. Неудивительно, что проблемами эволюции Вселенной и черных дыр часто занимаются одни и те же ученые (в частности, и автор этих строк).

Еще на рубеже XIII—XIV веков люди говорили: «Не давай два объяснения, если достаточно одного»; мы посчитали необходимым привести несколько аргументов, заставивших нас объединить в одной книжке рассказ о проблемах, казалось бы, столь разных.

Книга предназначена для тех, кто любит глубокие научные загадки. В ней говорится об отдельных особенностях, свойствах черных дыр и Вселенной, о том, как решаются одни проблемы и возникают новые. Конечно, при этом не ставится цель рассказать все и исчерпать вопрос. Такая цель была бы невыполнима для книги нашего жанра. Скорее автору хотелось с помощью отдельных штрихов создать образ тех грандиозных проблем, которые решены или решаются релятивистской астрофизикой.

Часть I.
Черные дыры.

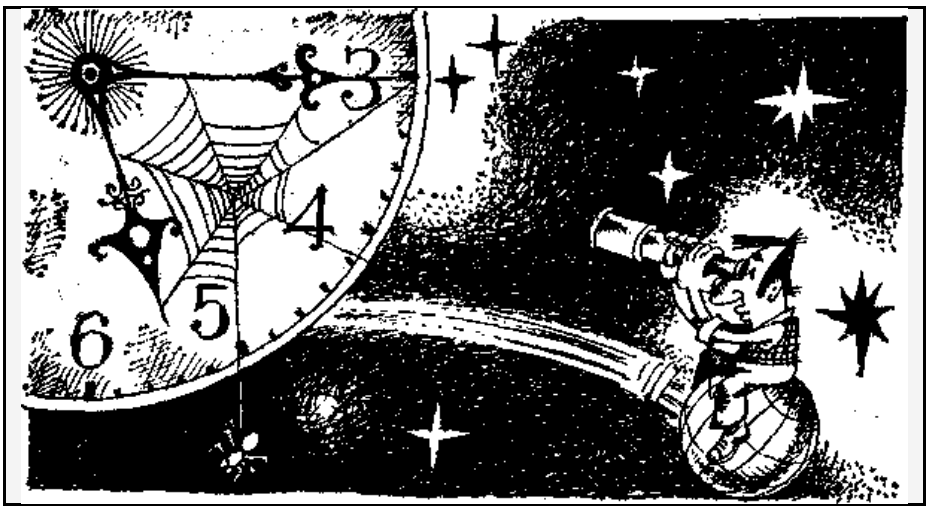


Глава I.
Что это такое?

Невидимые миру звезды

Черная дыра является порождением тяготения. Поэтому предысторию открытия черных дыр можно начать со времен И. Ньютона, открывшего закон всемирного тяготения — закон, управляющий силой, действию которой подвержено абсолютно все. Ни во времена И. Ньютона, ни сегодня, спустя века, не обнаружена иная столь универсальная сила. Все другие виды физического взаимодействия связаны с конкретными свойствами материи. Например, электрическое поле действует только на заряженные тела, а тела нейтральные совершенно к нему безразличны. И только тяготение абсолютно царствует в природе. Поле тяготения действует на все: на легкие частицы и тяжелые (причем при одинаковых начальных условиях совершенно одинаково), даже на свет. То, что свет притягивается массивными телами, предполагал еще И. Ньютон. С этого факта, с понимания того, что свет также подчинен силам тяготения, и начинается предыстория черных дыр, история предсказаний их поразительных свойств.

Одним из первых это сделал знаменитый французский математик и астроном П. Лаплас.



Имя П. Лапласа хорошо известно в истории науки. Прежде всего, он является автором огромного пятитомного труда «Трактат о небесной механике». В этой работе, публиковавшейся с 1798 по 1825 год, им была представлена классическая теория движения тел Солнечной системы, основанная только на законе всемирного тяготения Ньютона. До этой работы некоторые наблюдаемые особенности движения планет, Луны, других тел Солнечной системы не были полностью объяснены. Казалось даже, что они противоречат закону Ньютона. П. Лаплас тонким математическим анализом показал, что все эти особенности объясняются взаимным притяжением небесных тел, влиянием тяготения планет друг на друга. Только одна сила царит в небесах, провозглашал он, — это сила тяготения. «Астрономия, рассматриваемая с наиболее общей точки зрения, есть великая проблема механики», — писал П. Лаплас в предисловии к своему «Трактату». Кстати, сам термин «небесная механика», так прочно вошедший в науку, был впервые употреблен им.

П. Лаплас был также одним из первых, кто понял необходимость исторического подхода к объяснению свойств систем небесных тел. Он вслед за И. Кантом предложил гипотезу происхождения Солнечной системы из первоначально разреженной материи.

Главная идея гипотезы Лапласа о конденсации Солнца и планет из газовой туманности и до сих пор служит основой современных теорий происхождения Солнечной системы...

Обо всем этом много писалось в литературе и в учебниках точно так же, как и о гордых словах П. Лапласа, который в ответ на вопрос Наполеона: почему в его «Небесной механике» не упоминается бог? — сказал: «Я не нуждаюсь в этой гипотезе».

А вот о чем до последнего времени было мало известно, — это о предсказании им возможности существования невидимых звезд.

Предсказание было сделано в его книге «Изложение систем мира», вышедшей в 1795 году. В этой книге, которую мы бы сегодня назвали популярной, знаменитый математик ни разу не прибегнул к формулам и чертежам. Глубокое убеждение П. Лапласа в том, что тяготение действует на свет точно так же, как и на другие тела, позволило ему написать следующие знаменательные слова: «Светящаяся звезда с плотностью, равной плотности Земли и диаметром в 250 раз больше диаметра Солнца, не дает ни одному световому лучу достичь нас из-за своего тяготения; поэтому возможно, что самые яркие небесные тела во Вселенной оказываются по этой причине невидимыми».

В книге не приводилось доказательств этого утверждения. Оно было опубликовано им несколько лет спустя. Как рассуждал П. Лаплас? Он рассчитал, пользуясь теорией тяготения Ньютона, величину, которую мы теперь называем второй космической скоростью, на поверхности звезды. Это та скорость, которую надо придать любому телу, чтобы оно, поборов тяготение, навсегда улетело от звезды или планеты в космическое пространство. Если начальная скорость тела меньше второй космической, то силы тяготения затормозят и остановят движение тела и заставят его снова падать к тяготеющему центру. В наше время космических полетов каждый знает, что вторая космическая скорость на поверхности Земли равна 11 километрам в секунду. Вторая космическая скорость на поверхности небесного тела тем больше, чем больше масса и чем меньше радиус этого тела. Это понятно: ведь с ростом массы тяготение увеличивается, а с ростом расстояния от центра оно ослабевает.

На поверхности Луны вторая космическая скорость равна 2,4 километра в секунду, на поверхности Юпитера 61, на Солнце — 620, а на поверхности так называемых нейтронных звезд, которые по массе примерно такие же, как Солнце, но имеют радиус всего в десять километров, эта скорость достигает половины скорости света — 150 тысяч километров в секунду.

Представим себе, рассуждал П. Лаплас, что мы возьмем небесное тело, на поверхности которого вторая космическая скорость уже превышает скорость света. Тогда свет от такой звезды не сможет улететь в космос из-за действия тяготения, не сможет достичь далекого наблюдателя, и мы не увидим звезду, несмотря на то, что она излучает свет!

Если увеличивать массу небесного тела, добавляя к нему вещество с той же самой средней плотностью, то вторая космическая скорость увеличивается во столько же раз, во сколько возрастает радиус или диаметр.

Теперь понятен вывод, сделанный П. Лапласом: чтобы тяготение задержало свет, надо взять звезду с веществом той же плотности, что и Земля, а диаметром в 250 раз больше солнечного, то есть в 27 тысяч раз больше земного. Действительно, вторая космическая скорость на поверхности такой звезды будет тоже в 27 тысяч раз больше, чем на поверхности Земли, и примерно сравняется со скоростью света: звезда перестанет быть видимой.

Это было блестящим предвидением одного из свойств черной дыры — не выпускать свет, быть невидимой. Справедливости ради надо отметить, что П. Лаплас был не единственным ученым и формально даже не самым первым, кто сделал подобное

предсказание. Сравнительно недавно выяснилось, что в 1783 году с аналогичным утверждением выступал английский священник и геолог, один из основателей научной сейсмологии, Дж. Мичелл. Его аргументация была очень похожа на аргументацию П. Лапласа.

Сейчас между французами и англичанами идет иногда полушутливая, а иногда серьезная полемика: кого следует считать первооткрывателем возможности существования невидимых звезд — француза П. Лапласа или англичанина Дж. Мичелла? В 1973 году известные английские физики-теоретики С. Хокинг и Г. Эллис в книге, посвященной современным специальным математическим вопросам структуры пространства и времени, приводили работу француза П. Лапласа с доказательством возможности существования черных звезд; тогда о работе Дж. Мичелла еще не было известно. Осенью 1984 года известный английский астрофизик М. Рисе, выступая на конференции в Тулузе, сказал, что хотя это не очень удобно говорить на территории Франции, но он должен подчеркнуть, что первым предсказал невидимые звезды англичанин Дж. Мичелл, и продемонстрировал снимок первой страницы соответствующей его работы. Это историческое замечание было встречено и аплодисментами и улыбками присутствующих.

Как тут не вспомнить дискуссии между французами и англичанами о том, кто предсказал положение планеты Нептун по возмущениям в движении Урана: француз У. Леверье или англичанин Дж. Адаме? Как известно, оба ученых независимо правильно указали положение новой планеты. Тогда больше повезло французу У. Леверье. Такова участь многих открытий. Часто их делают почти одновременно и независимо разные люди. Обычно приоритет признается за тем, кто глубже проник в суть проблемы, но иногда это просто капризы фортуны.

Но предвидение П. Лапласа и Дж. Мичелла еще не было настоящим предсказанием черной дыры. Почему?

Дело в том, что во времена П. Лапласа еще не было известно, что быстрее света в природе ничто не может двигаться. Обогнать свет в пустоте нельзя! Это было установлено А. Эйнштейном в специальной теорий относительности уже в нашем веке. Поэтому для П. Лапласа рассматриваемая им звезда была только черной (несветящейся), и он не мог знать, что такая звезда теряет способность вообще как-либо «общаться» с внешним миром, что-либо «сообщать» далеким мирам о происходящих на ней событиях. Иными словами, он еще не знал, что это не только «черная», но и «дыра», в которую можно упасть, но невозможно выбраться. Теперь мы знаем, что если из какой-то области

пространства не может выйти свет, то, значит, и вообще ничто не может выйти, и такой объект мы называем черной дырой.

Другая причина, из-за которой рассуждения П. Лапласа нельзя считать строгими, состоит в том, что он рассматривал гравитационные поля огромной силы, в которых падающие тела разгоняются до скорости света, а сам выходящий свет может быть задержан, и применял при этом закон тяготения Ньютона.

А. Эйнштейн показал, что для таких полей теория тяготения Ньютона неприменима, и создал новую теорию, справедливую для сверхсильных, а также для быстроменяющихся! полей (для которых ньютоновская теория также неприменима!), и назвал ее общей теорией относительности. Именно выводами этой теории надо пользоваться для доказательства возможности существования черных дыр и для изучения их свойств.

Общая теория относительности — это изумительная теория. Она настолько глубока и стройна, что вызывает чувство эстетического наслаждения у всякого, кто знакомится с ней. Советские физики Л. Ландау и Е. Лифшиц в своем учебнике «Теория поля» назвали ее «самой красивой из всех существующих физических теорий». Немецкий физик Макс Борн сказал об открытии теории относительности: «Я восхищаюсь им как творением искусства». А советский физик В. Гинзбург писал, что она вызывает »...чувство... родственное тому, которое испытывают, глядя на самые выдающиеся шедевры живописи, скульптуры или архитектуры».

Многочисленные попытки популярного изложения теории Эйнштейна, конечно, могут дать общее впечатление о ней. Но, честно говоря, оно столь же мало похоже на восторг от познания самой теории, как знакомство с репродукцией «Сикстинской мадонны» отличается от переживания, возникающего при рассмотрении подлинника, созданного гением Рафаэля.

И тем не менее, когда нет возможности любования подлинником, можно (и нужно!) знакомиться с доступными репродукциями, лучше хорошими (а бывают всякие).

Для понимания невероятных свойств черных дыр нам необходимо сказать кратко о некоторых следствиях общей теории относительности Эйнштейна.

Гравитационный радиус

Чем же отличается теория тяготения Эйнштейна от теории Ньютона? Начнем с простейшего случая. Предположим, что мы находимся на поверхности сферической невращающейся планеты и измеряем силу притяжения этой планетой какого-либо тела с

помощью пружинных весов. Мы знаем, что согласно закону Ньютона эта сила пропорциональна произведению массы планеты на массу тела и обратно пропорциональна квадрату радиуса планеты. Радиус планеты можно определить, например, измеряя длину ее экватора и деля на 2π.

А что говорит о силе притяжения теория Эйнштейна? Согласно ей сила будет чуточку больше, чем вычисленная по формуле Ньютона. Мы потом уточним, что значит это «чуточку больше».

Представим себе теперь, что мы можем постепенно уменьшать радиус планеты, сжимая ее и сохраняя при этом ее полную массу. Сила тяготения будет нарастать (ведь радиус уменьшается). По Ньютону, при сжатии вдвое сила возрастает вчетверо. По Эйнштейну, возрастание силы опять же будет происходить чуточку быстрее. Чем меньше радиус планеты, тем больше это отличие.

Если мы сожмем планету настолько, что поле тяготения станет сверхсильным, то различие между величиной силы, рассчитываемой по теории Ньютона, и истинным ее значением, даваемым теорией Эйнштейна, нарастает чрезвычайно. По Ньютону, сила тяготения стремится к бесконечности, когда мы сжимаем тело в точку (радиус близок к нулю). По Эйнштейну, вывод совсем другой: сила стремится к бесконечности, когда радиус тела становится равным так называемому гравитационному радиусу. Этот гравитационный радиус определяется массой небесного тела. Он тем меньше, чем меньше масса. Но даже для гигантских масс он очень мал. Так, для Земли он равен всего одному сантиметру! Даже для Солнца гравитационный радиус равен только 3 километрам. Размеры небесных тел обычно много больше их гравитационных радиусов. Например, средний радиус Земли составляет 6400 километров, радиус Солнца 700 тысяч километров. Если же истинные радиусы тел много больше их гравитационных, то отличие сил, рассчитанных по теории Эйнштейна и теории Ньютона, крайне мало. Так, на поверхности Земли это отличие составляет одну миллиардную часть от величины самой силы.

Только когда радиус тела при его сжатии приближается к гравитационному радиусу, в столь сильном поле тяготения различия нарастают заметно, и, как уже говорилось, при радиусе тела, равном гравитационному, истинное значение силы поля тяготения становится бесконечным.

Прежде чем обсуждать, к каким следствиям это ведет, познакомимся с некоторыми другими выводами теории Эйнштейна.

Суть ее заключается в том, что она неразрывно связала, геометрические свойства пространства и течение времени с силами гравитации. Эти связи сложны и многообразны. Отметим пока лишь только два важных обстоятельства.

Согласно теории, Эйнштейна время в сильном поле тяготения течет медленней, чем время, измеряемое вдали от тяготеющих масс (где гравитация слаба). О том, что время может течь по-разному, современный читатель, конечно, слышал. И все же к этому факту трудно привыкнуть. Как Может время течь по-разному? Ведь согласно нашим интуитивным представлениям время — это длительность, то общее, что присуще всем процессам. Оно подобно реке, текущей неизменно. Отдельные процессы могут течь и быстрее и медленнее, мы можем на них влиять, помещая в разные условия. Например, можно нагреванием ускорить течение химической реакции или замораживанием замедлить жизнедеятельность организма, но движение электронов в атомах при этом будет протекать в прежнем темпе. Все процессы, как нам представляется, погружены в реку абсолютного времени, на течение которой, казалось бы, ничто влиять не может. Можно, по нашим представлениям, убрать из этой реки вообще все процессы, и все равно время будет течь как пустая длительность.

Так считалось в науке и во времена Аристотеля, и во времена И. Ньютона, и позже — вплоть До А. Эйнштейна. Вот что пишет Аристотель в своей книге «Физика»: «Время, протекающее в двух подобных и одновременных движениях, одно и то же. Если бы оба промежутка времени не протекали одновременно, они все-таки были бы одинаковы... Следовательно, движения могут быть разные и независимые друг от друга. И в том и в другом случае время абсолютно одно и то же».

Еще выразительнее писал И. Ньютон, считая, что говорит об очевидном: «Абсолютное, истинное, математическое время, взятое само по себе, без отношения к какому-нибудь телу, протекает единообразно, соответственно своей собственной природе».

Догадки о том, что представления об абсолютном времени отнюдь не столь очевидны, иногда высказывались и в давние времена. Так, Лукреций Кар в I веке до нашей эры писал в поэме «О природе вещей»: «Время существует не само по себе... Нельзя понимать время само по себе, независимо от состояния покоя и движения тел».

Но только А. Эйнштейн доказал, что никакого абсолютного времени нет. Течение времени зависит от движения и, что сейчас для нас особенно важно, от поля тяготения. В сильном поле

тяготения все процессы, абсолютно все, будучи самой разной природы, замедляются для стороннего наблюдателя. Это и значит, что время — то есть то общее, что присуще всем процессам, — замедляется.

Замедление это обычно невелико. Так, на поверхности Земли время протекает медленнее, чем в далеком космосе, всего на ту же одну миллиардную часть, как и в случае с вычислением силы тяготения.

Хочется особенно подчеркнуть, что такое ничтожное замедление времени в поле тяготения Земли непосредственно измерено. Измерено замедление времени и в поле тяготения звезд, хотя обычно там оно тоже крайне мало. В очень сильном поле тяготения замедление заметно больше и становится бесконечно большим, когда радиус тела сравнивается с гравитационным.

Второй важный вывод теории Эйнштейна состоит в том, что в сильном поле тяготения меняются геометрические свойства пространства. Эвклидова геометрия, столь нам привычная, оказывается уже несправедливой. Это означает, например, что сумма углов в треугольнике не равна двум прямым углам, а Длина окружности не равна расстоянию ее от центра, умноженному на 2π. Свойства обычных геометрических фигур становятся такими же, как будто они начерчены не на плоскости, а на искривленной поверхности. Поэтому и говорят, что пространство «искривляется» в гравитационном поле. Разумеется, это искривление заметно только в сильном поле тяготения, если размер тела приближается к его гравитационному радиусу.

Конечно, представление об искривлении самого пространства так же трудносовместимо с нашими укоренившимися интуитивными представлениями, как и представление о разном течении времени.

Столь же определенно, как и о времени, И. Ньютон писал о пространстве: «Абсолютное пространство, по своей собственной природе независимое от всякого отношения к внешним предмета, остается неизменным и неподвижным». Пространство представлялось ему как некая бесконечная «сцена», на которой разыгрываются «события», никак не влияющие на эту «сцену».

Еще первооткрыватель неэвклидовой, «искривленной» геометрии — Н. Лобачевский высказывал мысль о том, что в некоторых физических ситуациях может проявляться его — Н. Лобачевского — геометрия, а не геометрия Эвклида. А. Эйнштейн своими расчетами показал, что пространство действительно «искривляется» в сильном поле тяготения.

Этот вывод теории также подтвержден прямыми

экспериментами.

Почему же мы с таким трудом воспринимаем выводы общей теории относительности о пространстве и времени? Да потому, что повседневный опыт человечества, и даже опыт точной науки, на протяжении веков имел дело только с условиями, когда изменения свойств времени и пространства совершенно незаметны и посему полностью пренебрегались. Все наши знания основываются на повседневном опыте. Вот мы и привыкли к тысячелетней догме об абсолютно неизменяемых пространстве и времени. Наступила наша эпоха. Человечество в своих познаниях столкнулось с условиями, когда влиянием материи на свойства пространства и времени пренебрегать нельзя. Несмотря на инертность нашего мышления, мы должны привыкнуть к такой необычности. И теперь новое поколение людей уже гораздо легче воспринимает истины теории относительности (основы специальной теории относительности изучают сейчас в школе!), чем это было несколько десятилетий назад, когда теорию Эйнштейна с трудом воспринимали даже самые передовые умы.

Сделаем еще одно замечание о выводах теории относительности. Ее автор показал, что свойства пространства и времени не только могут меняться, но что пространство и время объединяются вместе в единое целое — четырехмерное «пространство-время». Искривляется именно это единое многообразие. Конечно, наглядные представления в такой четырехмерной сверхгеометрии еще более трудны и мы здесь не будем на них останавливаться.

Вернемся к полю тяготения вокруг сферической массы.

Так как геометрия в сильном поле тяготения неэвклидова, искривленная, то надо уточнить, что такое радиус окружности, например, экватора планеты. В обычной геометрии радиус можно определить двояко: во-первых, это расстояние точек окружности от центра, во-вторых, это длина окружности, деленная на 2π. Но в неэвклидовой геометрии эти две величины не совпадают из-за «кривизны» пространства.

Использование именно второго метода определения радиуса тяготеющего тела (а не самого расстояния от центра до окружности) имеет ряд преимуществ. Для измерения такого радиуса не надо приближаться к центру тяготеющих масс. Последнее весьма важно, например, для измерения радиуса Земли было бы весьма сложно проникнуть в ее центр, но не очень сложно измерить длину экватора.

Для Земли и нет никакой необходимости непосредственно измерять расстояние до центра, ибо поле тяготения Земли невелико, и для нас с большей точностью справедлива геометрия

Эвклида, а длина экватора, деленная на 2π, равна расстоянию до центра. В сверхплотных звездах с сильным нолем тяготения это, однако, не так: разница в «радиусах», определенных разными способами, может быть весьма заметной. Более того, как мы увидим далее, в ряде случаев достигнуть центра тяготения принципиально невозможно. Поэтому мы всегда будем понимать под радиусом окружности ее длину, деленную на 2π.

Рассматриваемое нами поле тяготения вокруг сферического невращающегося тела получило название поля Шварцшильда, по имени ученого, который сразу же после создания Эйнштейном теории относительности решил ее уравнения для данного случая.

Немецкий астроном К. Шварцшильд был одним из творцов современной теоретической астрофизики, им выполнен ряд ценных работ в области практической астрофизики и других разделов астрономии. На заседании Прусской академии наук, посвященной памяти К. Шварцшильда, умершего в возрасте всего 42 лет, так оценивал А. Эйнштейн его вклад в науку:

«В теоретических работах Шварцшильда особенно поражают уверенное владение математическими методами исследования и та легкость, с которой он постигает существо астрономической или физической проблемы. Редко встречаются столь глубокие математические познания в сочетании со здравым смыслом и такой гибкостью мышления, как у него. Именно эти дарования позволили ему выполнить важные теоретические работы в тех областях, которые отпугивали других исследователей математическими трудностями. Побудительной причиной его неиссякаемого творчества, по-видимому, в гораздо большей степени можно считать радость художника, открывающего тонкую связь математических понятий, чем стремление к познанию скрытых зависимостей в природе».

К. Шварцшильд получил решение уравнений Эйнштейна для поля тяготения сферического тела в декабре 1915 года, через месяц после завершения А. Эйнштейном публикации своей теории. Как мы уже говорили, эта теория очень сложна из-за совершенно новых, революционных понятий, но, оказывается, ее уравнения еще очень сложны, так сказать, чисто технически. Если формула закона тяготения И. Ньютона знаменита своей классической простотой и краткостью, то в случае новой теории для определения поля тяготения надо решить систему десяти уравнений, каждое из которых содержит сотни (!) слагаемых. И это не просто алгебраические уравнения, а дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка.

В наше время для оперирования с подобными задачами используется весь арсенал электронных вычислительных машин.

Во времена К. Шварцшильда, разумеется, ничего подобного не было и единственными инструментами были перо и бумага.

Но надо сказать, что и сегодня работа в области теории относительности требует иногда долгих и кропотливых математических преобразований вручную (без электронной машины), являющихся часто нудными и однообразными из-за огромного количества членов в формулах. Но без чернового труда не обойтись. Я часто предлагаю студентам (а иногда аспирантам и научным работникам), покоренным фантастичностью общей теории относительности, познакомившимся с ней по учебникам и желающим в ней работать, конкретно вычислить своими руками хоть одну сравнительно простую величину в задачах этой теории. Не все после многодневных (а иногда и гораздо более долгих!) вычислений столь же горячо продолжают стремиться посвятить свою жизнь этой науке.

В оправдание такой «жесткой» проверки на любовь скажу, что я сам прошел через подобное испытание. (Кстати, согласно преданиям в былые времена и обычная человеческая любовь подвергалась испытаниям подвигами.) В студенческие годы моим учителем по теории относительности был известный специалист и очень скромный человек А. Зельманов. Для моей дипломной работы он, поставил передо мной задачу, связанную с удивительным свойством поля тяготения — возможностью «уничтожить» его в любом месте по своему желанию. «Как? — воскликнет читатель. — Ведь в учебниках сказано, что от тяготения в принципе нельзя загородиться никакими экранами, что выдуманное фантастом Г. Уэллсом вещество «кэй-ворит» является чистейшим вымыслом, невозможным в реальности!»

Все это так, и если оставаться неподвижным, например, относительно Земли, то силу ее тяготения не уничтожить. Но действие этой силы можно полностью устранить, начав свободно падать! Тогда наступает невесомость. В кабине космического корабля с выключенными двигателями, летящего по орбите вокруг Земли, нет силы тяжести, вещи и сами космонавты плавают в кабине, не ощущая никакой тяжести. Мы все много раз видели это на экранах телевизоров в репортажах с орбиты. Заметим, что никакое другое поле, кроме поля тяготения, не допускает подобного простого «уничтожения». Электромагнитное поле, например, так убрать нельзя.

Со свойством «устранимости» тяготения связана сложнейшая проблема теории — проблема энергии поля тяготения. Она, по мнению некоторых физиков не решена и до сих пор. Формулы теории позволяют вычислить для какой-либо массы полную энергию ее гравитационного поля во всем пространстве. Но

нельзя указать, где конкретно находится эта энергия, сколько ее в том или ином месте пространства. Как говорят физики, нет понятия плотности гравитационной энергии в точках пространства.

Мне в моей дипломной работе предстояло показать прямым вычислением, что известные в то время математические выражения для плотности энергии гравитационного поля бессмысленны даже для наблюдателей, не испытывающих свободного падения, скажем, для наблюдателей, стоящих на Земле и явно чувствующих силу, с которой планета их притягивает. Математические выражения, с которыми мне предстояло работать, были еще более громоздкими, чем уравнения поля тяготения, о которых мы говорили выше. Я даже просил А. Зельманова дать мне ещё кого-нибудь в помощники, который делал бы эти же вычисления параллельно, ведь я мог ошибиться. А. Зельманов вполне определенно отказал мне. «Вы должны это сделать сами», — был его ответ.

Когда все уже было позади, я увидел, что потратил на эту рутинную работу несколько сотен часов. Почти все вычисления пришлось провести дважды, а некоторые и больше. Ко дню защиты диплома темп работы стремительно возрастал, подобно скорости свободно падающего тела в поле тяготения. Правда, надо заметить, что суть работы состояла не только в прямых вычислениях. По ходу дела надо было еще думать и решать принципиальные вопросы.

Это была моя первая публикация по общей теории относительности.

Но вернемся к работе К. Шварцшильда. Он с помощью изящного математического анализа решил задачу для сферического тела и переслал ее А. Эйнштейну для передачи Берлинской академии. Решение поразило А. Эйнштейна, так как сам он к тому времени получил лишь приближенное решение, справедливое только в слабом поле тяготения. Решение же К. Шварцшильда было точным, то есть справедливым и для сколь угодно сильного поля тяготения вокруг сферической массы; в этом было его важное значение. Но ни А. Эйнштейн, ни сам К. Шварцшильд тогда еще не знали, что в этом решении содержится нечто гораздо большее. В нем, как выяснилось позже, содержится описание черной дыры.

А теперь продолжим разговор о второй космической скорости. Какую скорость согласно уравнениям Эйнштейна надо придать ракете, стартующей с поверхности планеты, чтобы она, поборов силы тяготения, улетела в космос?

Ответ оказался чрезвычайно прост. Здесь справедлива та же

формула, что и в ньютоновской теории. Значит, вывод П. Лапласа о невозможности для света уйти от компактной тяготеющей массы подтвердился теорией тяготения Эйнштейна, согласно которой вторая космическая скорость должна быть равна скорости света как раз на гравитационном радиусе.

Сфера с радиусом, равным гравитационному, получила название сферы Шварцшильда.

Предсказание

Итак, согласно теории Эйнштейна, как только радиус небесного тела становится равным его гравитационному радиусу, свет не сможет уйти с поверхности этого тела к далекому наблюдателю, то есть оно станет невидимым. Но читатель наверняка уже обратил внимание, что это чрезвычайно необычное свойство далеко не единственное из тех «чудес», которые должны произойти с телом, размеры которого сравнялись с гравитационным радиусом. Согласно сказанному в предыдущем разделе сила тяготения на поверхности звезды с радиусом, равным гравитационному, должна стать бесконечно большой, так же как и бесконечно большим должно быть ускорение свободного падения. К чему это может привести?

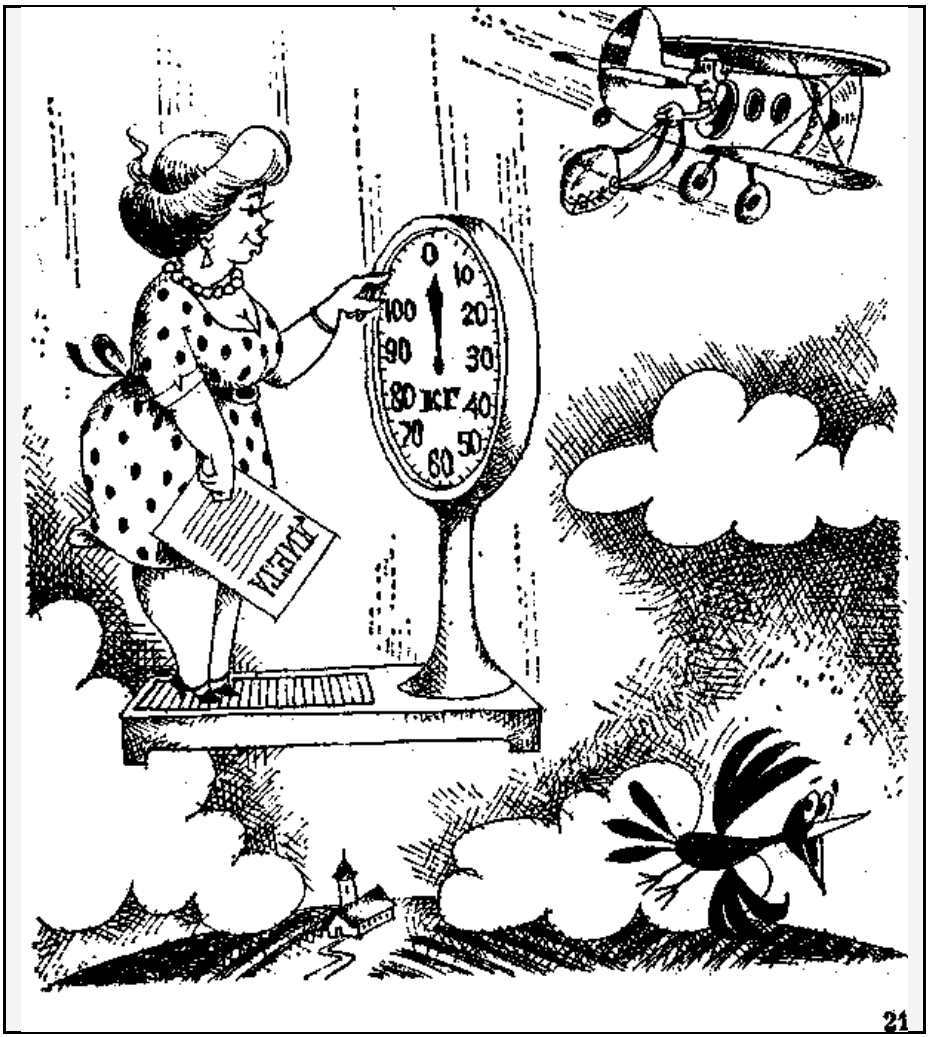
Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним сначала, почему обычные звезды и планеты не сжимаются к центру под действием тяготения, а представляют собой равновесные тела.

Сжатию к центру препятствуют силы внутреннего давления вещества. В звездах это давление газа с очень высокой температурой, стремящееся расширить звезду. В планетах типа Земли это силы натяжения, упругости, давления, также препятствующие сжатию. Равенство сил тяготения и указанных противоборствующих сил как раз и обеспечивает равновесие небесного тела.

Противоборствующие тяготению силы зависят от состояния вещества: от его давления и температуры. При его сжатии они увеличиваются. Однако если сжать вещество до какой-то конечной (не бесконечно большой) плотности, то они останутся также конечными. Иначе обстоит дело с силой тяготения. С приближением размера небесного тела к гравитационному радиусу тяготение стремится, как мы знаем, к бесконечности. Теперь оно не может быть уравновешено противоборствующей конечной силой давления, и тело должно неудержимо сжиматься к центру под его действием.

Итак, важнейший вывод теории Эйнштейна гласит: сферическое тело, радиус которого равен гравитационному

радиусу и меньше, не может находиться в покое, должно сжиматься к центру. «Но позвольте, — спросит читатель, — если на гравитационном радиусе сила тяготения бесконечна, то какова она станет, как только тело уменьшится до размеров меньше гравитационного радиуса?»



21

Ответ довольно очевиден. До сих пор мы говорили о силе тяготения на поверхности статического, не сжимающегося в данное время тела. Но она зависит от состояния движения. Как мы уже говорили выше, при свободном падении наступает состояние невесомости — свободно падающее тело вообще не испытывает действия гравитационной силы. Поэтому на поверхности свободно сжимающегося тела не ощущается никакой

силы тяготения (и вне сферы Шварцшильда, и внутри ее). Увлекаемое тяготением вещество не может остановиться на сфере Шварцшильда (оно испытало бы тогда бесконечную силу тяготения). Тем более не может оно остановиться внутри сферы Шварцшильда. Любая частица, например ракета, со сколь угодно сильным двигателем, оказавшись от тяготеющего центра на расстоянии меньше гравитационного радиуса, должна неудержимо падать к этому центру.

Итак, мы получили ответ на вопрос о том, к чему ведет бесконечное нарастание гравитационной силы с приближением тела к сфере Шварцшильда: к катастрофическому, неудержимому его сжатию. Физики называют это явление релятивистским коллапсом.

Таким образом, достаточно сжать тело до размеров гравитационного радиуса, а дальше оно само будет неудержимо сжиматься. Так возникает объект, который впоследствии получил название черной дыры.

Описанный нами процесс релятивистского гравитационного коллапса впервые был строго рассчитан с помощью уравнений общей теории относительности американскими физиками Р. Оппенгеймером и Г. Волковым в 1939 году. Их статья является образцом краткости и ясности изложения. Полностью и строго описывая суть явления, она занимает всего несколько страниц.

Имя Р. Оппенгеймера хорошо известно не только физикам, но и широкой общественности. Он участвовал в создании американской атомной бомбы, в 1943—1945 годах возглавлял знаменитую Лос-Аламосскую научную лабораторию. Но впоследствии понял, какую опасность человечеству несет создание водородной бомбы и гонка вооружений, выступил за использование атомной энергии только в мирных целях и в 1953 году был снят со всех постов как неблагонадежный американец.

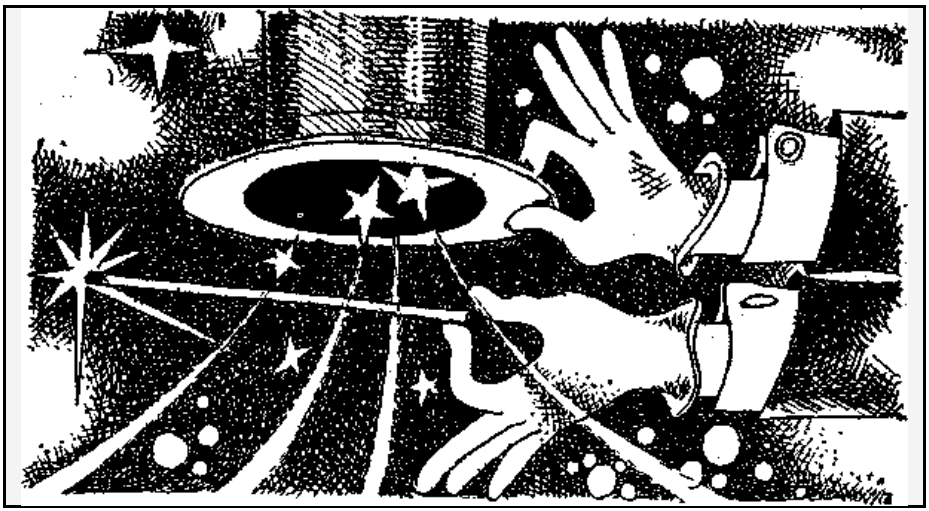
Работу Р. Оппенгеймера и Г. Волкова следует считать строгим предсказанием возможности возникновения черных дыр. Само название «черная дыра» появилось гораздо позже — в конце 60-х годов. Придумал его американский физик Д. Уилер. До этого они известны были под разными именами. Например, у нас их называли «коллапсарами», однако выяснилось, что это слово звучит не очень благозвучно по-английски. Впрочем, с названием «черная дыра», несмотря на его точность и образность, тоже бывали казусы.

Закончим этот раздел следующим замечанием. Черную дыру можно в принципе сделать искусственно. Для этого надо сжать любую массу до размеров гравитационного радиуса, дальше она сама будет сжиматься, испытывая гравитационный коллапс.

Правда, на этом пути лежат огромные технические трудности. Чем меньшую массу мы хотим превратить в черную дыру, тем до меньших размеров ее необходимо сжать, поскольку гравитационный радиус прямо пропорционален массе. Так, мы знаем, что гравитационный радиус Земли равен примерно одному сантиметру. А чтобы превратить в черную дыру, скажем, гору размером в миллиард тонн, пришлось бы ее сжать до размера атомного ядра!

В последующих разделах мы увидим, что во Вселенной большие массы могут самопроизвольно превращаться в черные дыры в ходе естественной эволюции. Однако, прежде чем говорить об этом, продолжим знакомство с удивительными особенностями черных дыр.

Глава II.
Вокруг черной дыры



Дыра во времени

Как уже говорилось, теория тяготения предсказывает, что время течет тем медленней, чем ближе часы находятся к гравитационному радиусу. Это означает, что, какие бы процессы ни протекали в сильном поле тяготения, далекий от черной дыры наблюдатель увидит их в замедленном темпе.

Так, для него колебания в атомах, излучающих свет в сильном поле тяготения, происходят замедленно, и фотоны от этих атомов приходят к нему «покрасневшими», с уменьшенной частотой. Это явление носит название гравитационного красного смещения (оно послужило основой для одной из проверок правильности теории Эйнштейна). Для нас сейчас важен тот факт, что замедление времени и покраснение света тем больше, чем ближе область излучения располагается к границе черной дыры (к сфере Шварцшильда). Там время замедляет свой бег, и на самой границе черной дыры оно как бы замирает для далекого наблюдателя. Этот наблюдатель, следя, например, за камнем, падающим к черной дыре, видит, как у самой сферы Шварцшильда он постепенно «тормозится» и приблизится к границе черной дыры лишь за бесконечно долгое время.

Аналогичную картину увидит далекий наблюдатель при

самом процессе образования черной дыры — когда под действием тяготения само вещество звезды падает, устремляется к ее центру. Для него поверхность звезды лишь за бесконечно долгое время приближается к сфере Шварцшильда, как бы застывая на гравитационном радиусе. Поэтому раньше черные дыры называли еще застывшими звездами.

Но это застывание вовсе не значит, что наблюдатель будет вечно созерцать застывшую поверхность звезды на гравитационном радиусе. Вспомним о замедлении времени, о покраснении света, выходящего из сильного гравитационного поля. С приближением поверхности звезды к гравитационному радиусу наблюдатель видит все более и более покрасневший свет звезды, несмотря на то, что на самой звезде продолжают рождаться обычные фотоны. Менее энергичные («покрасневшие») фотоны к тому же приходят к наблюдателю все реже и реже. Интенсивность света падает.

К факту покраснения света из-за замедления времени, обусловленного сильным полем тяготения, прибавляется еще покраснение света из-за Доплер-эффекта. Действительно, ведь поверхность сжимающейся звезды неуклонно удаляется от наблюдателя. А известно, что свет от удаляющегося источника воспринимается также покрасневшим.

Итак, совместное действие Доплер-эффекта и замедления времени в сильном поле тяготения ведет к тому, что с приближением поверхности звезды к сфере Шварцшильда далекий наблюдатель видит свет все более покрасневшим и все меньшей интенсивности — звезда становится невидимой. Ее яркость стремится к нулю, и ни в какие телескопы ее нельзя уже обнаружить. При этом потухание происходит для далекого наблюдателя практически мгновенно. Так, звезда с массой Солнца после того, как она сожмется до размеров удвоенного гравитационного радиуса, потухнет для внешнего наблюдателя за стотысячную долю секунды.

Нельзя обнаружить поверхность застывшей у гравитационного радиуса звезды и радиолокационным методом. Радиосигналы будут бесконечно долго двигаться к гравитационному радиусу и никогда не вернутся к пославшему их наблюдателю. Звезда для внешнего наблюдателя полностью «исчезает», и остается только ее гравитационное поле. Внешний наблюдатель никогда не увидит то, что произойдет со звездой после ее сжатия до размеров меньше гравитационного радиуса.

«Стоп! — скажет читатель. — О каких размерах меньше гравитационного радиуса можно говорить, когда сам процесс сжатия до гравитационного радиуса растягивается на

бесконечный срок? Ведь мы только что говорили, что звезда застывает при размерах, равных гравитационному радиусу. Когда же она станет меньше гравитационного радиуса? После бесконечного долгого времени?» Вот тут-то и проявляется одна из самых удивительных и важных истин, открытых теорией относительности, — относительность временных промежутков, зависимость их от состояния движения наблюдателя. Вспомним, что уже в специальной теории относительности, где роль гравитационных полей не учитывается, один и тот же процесс с точки зрения разных наблюдателей имеет различную длительность: часы на быстро летящей ракете идут с точки зрения наземного наблюдателя медленнее, чем его собственные. Это явление проверено непосредственным физическим экспериментом. В случае же падения к черной дыре относительность длительности процесса проявляется в совершенно удивительном виде. Рассмотрим такое явление подробнее.

Представим себе ряд наблюдателей, расположенных вдоль линии, продолжающей радиус черной дыры, и неподвижных по отношению к ней. Например, они могут находиться на ракетах, двигатели которых работают, не давая наблюдателям падать на черную дыру. Далее, представим себе еще одного наблюдателя на ракете с выключенным двигателем, который свободно падает к черной дыре. По мере падения он проносится мимо неподвижных наблюдателей со всевозрастающей скоростью. При падении к черной дыре с большого расстояния эта скорость равняется второй космической скорости. Скорость падения стремится к световой, когда падающее тело приближается к гравитационному радиусу. Ясно, что темп течения времени на свободно падающей ракете с ростом скорости уменьшается. Это уменьшение настолько значительное, что с точки зрения наблюдателя с любой неподвижной ракеты для того, чтобы падающий успел достичь сферы Шварцшильда, проходит бесконечный промежуток времени, а по часам падающего наблюдателя это время соответствует конечному промежутку. Таким образом, бесконечное время одного наблюдателя на неподвижной ракете равно конечному промежутку времени другого (на падающей ракете), причем промежутку очень малому,— так, мы видели, для массы Солнца это всего стотысячная доля секунды. Что может быть более наглядным примером относительности временной протяженности?

Итак, по часам, расположенным на сжимающейся звезде, она за конечное время сжимается до размеров гравитационного .радиуса и будет продолжать сжиматься дальше, к еще меньшим

размерам. Но далекий внешний наблюдатель этих последних этапов эволюции, как мы помним, никогда не увидит. А что будет видеть наблюдатель на сжимающейся звезде после своего ухода под сферу Шварцшильда? Что будет со звездой?

Отложим на некоторое время эти вопросы, а сейчас вернемся к внешнему полю черной дыры и посмотрим, как в этом сверхсильном поле движутся тела и распространяются лучи света.

Небесная механика черных дыр

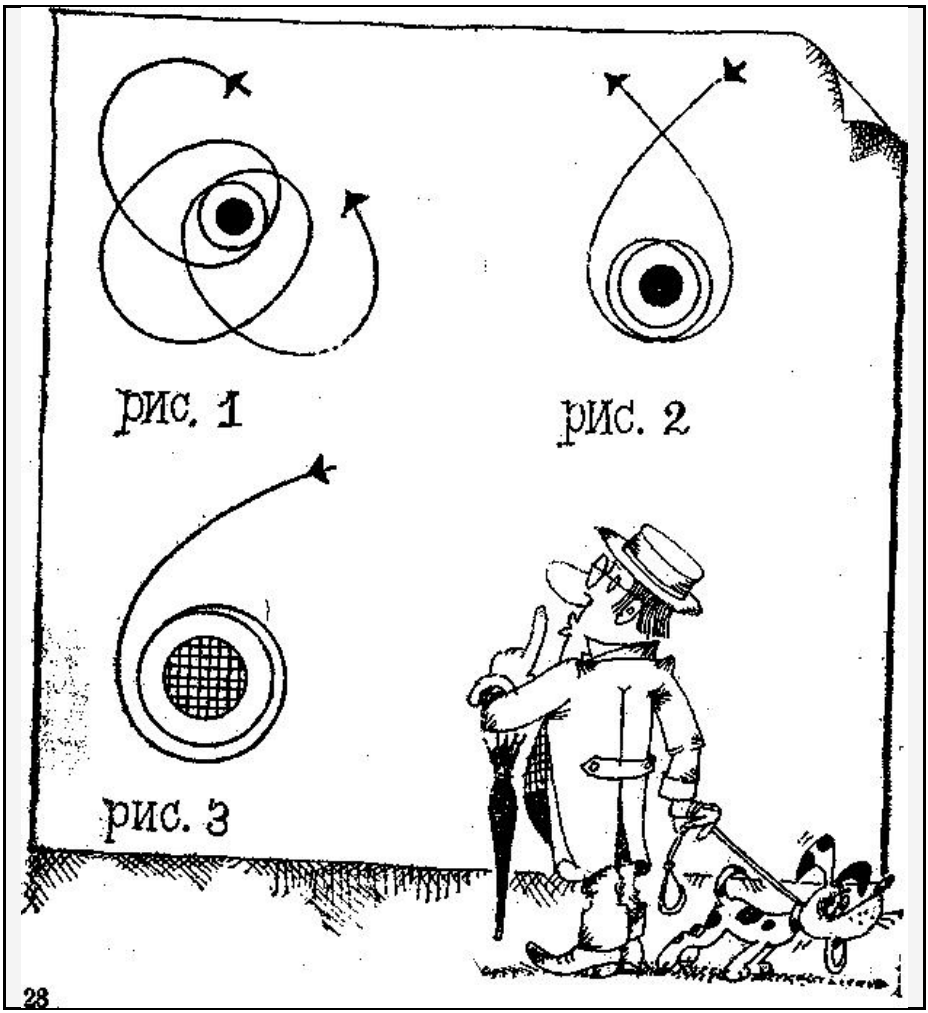
Согласно ньютоновской теории тяготения любое тело в гравитационном поле звезды движется либо по разомкнутым кривым — гиперболе или параболе, — либо по замкнутой кривой — эллипсу в зависимости от того, велика или мала начальная скорость движения). У черной дыры наибольших от нее расстояниях поле тяготения слабо, и здесь все явления с большой точностью описываются теорией Ньютона, то есть законы ньютоновской небесной механики здесь справедливы. Однако с приближением к черной дыре они нарушаются все больше и больше.

Познакомимся с некоторыми важнейшими особенностями движения тел в поле тяготения черной дыры.

По теории Ньютона, если скорость тела меньше второй космической, то оно движется по эллипсу около центрального тела — тяготеющего центра (ТЦ). У эллипса есть ближайшая к ТЦ точка (периастр) и наиболее удаленная (апоастр). По теории Эйнштейна, в случае движения тела со скоростью, меньшей второй космической, траектория его также имеет периастр и апоастр, но она уже не эллипс; оно движется по незамкнутой орбите, то приближаясь к черной дыре, то снова удаляясь от нее. Траектория вся целиком лежит в одной плоскости, но вблизи черной дыры она может выглядеть весьма причудливо, как, например, показано на рисунке 1. Если же она лежит достаточно далеко, то вид ее представляет собой медленно поворачивающийся в пространстве эллипс. Такой медленный поворот эллиптической орбиты Меркурия на 43 угловых секунды в столетие послужил первым подтверждением правильности теории тяготения Эйнштейна. Очень интересно рассмотреть простейшее периодическое движение тела в поле черной дыры по круговой орбите. По теории Ньютона, движение по кругу возможно на любом расстоянии от ТЦ. Из теории Эйнштейна следует, что это не так. Чем ближе к ТЦ, тем больше скорость движущегося по окружности тела. На окружности, удаленной на полтора гравитационных радиуса, скорость обращающегося тела

достигает световой. На еще более близкой к черной дыре окружности движение его вообще невозможно, ибо для этого ему потребовалась бы скорость больше скорости света.

Но, оказывается, в реальной ситуации движение по окружности вокруг черной дыры невозможно и на больших расстояниях, начиная с трех гравитационных радиусов, когда скорость движения составляет всего половину скорости света. В чем же причина?



Дело в том, что на расстояниях меньше трех гравитационных радиусов движение по окружности неустойчиво. Малейшее возмущение, сколько угодно малый толчок заставят вращающееся тело уйти с орбиты и либо упасть в черную дыру, либо улететь в

пространство (ничего похожего не предусматривает ньютоновская «Небесная механика»). Но, пожалуй, самое интересное и необычное в новой небесной механике — это возможность гравитационного захвата черной дырой тел, прилетающих из космоса. Напомним, что в ньютоновской механике всякое тело, прилетающее к тяготеющей массе из космоса, описывает вокруг нее параболу или гиперболу и (если не «стукнется» о поверхность тяготеющей массы) снова улетает в космос — гравитационный захват невозможен. Иначе обстоит дело в поле тяготения черной дыры. Конечно, если прилетающее тело движется на большом расстоянии от черной дыры (на расстоянии десятков гравитационных радиусов и больше), там, где поле тяготения слабо и справедливы законы механики Ньютона, то оно движется почти точно по параболе или гиперболе. Но если оно пролетает достаточно близко от дыры, то его орбита совсем не похожа на гиперболу или параболу. В случае, если оно вдали от черной дыры имеет скорость много меньше световой и его орбита подходит близко к окружности с радиусом, равным двум гравитационным радиусам, то оно обернется вокруг черной дыры несколько раз, прежде чем «снова улетит в космос. Этот случай изображен на рисунке 2.

Наконец, если вращающееся тело подойдет вплотную к указанной окружности двух гравитационных радиусов, то его орбита будет на эту окружность навиваться; тело окажется гравитационно захваченным черной дырой и никогда снова не улетит в космос (рисунок 3). Если тело подойдет еще ближе к черной дыре, оно упадет в черную дыру и также окажется гравитационно захваченным.

Прежде чем перейти к другим физическим явлениям в поле тяготения черной дыры, сделаем еще одно замечание, касающееся второй космической скорости. Мы уже говорили раньше, что для второй космической скорости справедлива формула теории Ньютона и тело, обладающее такой и большей скоростью, навсегда улетает от черной дыры в космос. Однако мы должны сделать оговорку.

Очевидно, что если тело движется к черной дыре непосредственно вдоль радиуса, то, какую бы скорость оно ни имело, оно врежется в черную дыру и не улетит в космос.

Более того, нам теперь известно, что если тело будет двигаться хоть и не прямо по радиусу к черной дыре, но орбита его пройдет на достаточно близком расстоянии от черной дыры, то оно будет гравитационно захвачено. Следовательно, чтобы вырваться из окрестностей черной дыры, мало иметь скорость больше второй космической, надо еще, чтобы направление этой

скорости составляло с направлением на черную дыру угол больше некоторого критического значения. Если угол будет меньше, тело гравитационно захватится, если больше (и скорость равна второй космической), то улетит в космос. Значение этого критического угла зависит от расстояния до черной дыры. Чем дальше от нее, тем меньше критический угол. На расстоянии нескольких гравитационных радиусов надо уже точно «прицелиться» в черную дыру, чтобы быть ею захваченной.

Наконец, скажем несколько слов еще об одном важном процессе, возникающем при движении тел в поле черной дыры. Речь идет об излучений гравитационных волн. Теория тяготения Эйнштейна предсказывает их существование.

Что же представляют собой эти волны, носящие столь экзотическое название. Они подобны электромагнитным, которые являются быстро меняющимся электромагнитным полем, «оторвавшимся» от своего источника и распространяющимся в пространстве с предельно большой скоростью — скоростью света. Точно так же гравитационные волны являются изменяющимся гравитационным полем, «оторвавшимся» от своего источника и летящим в пространстве со скоростью света.

Известно, чтобы обнаружить электромагнитную волну, достаточно в принципе взять электрически заряженный шарик и наблюдать за ним; когда на него станет падать электромагнитная волна, шарик придет в колебательное движение. Но чтобы обнаружить гравитационную волну, одним шариком не обойтись. Потребуется минимум два, помещенных на некотором расстоянии друг от друга (заряжать их электричеством* конечно, не нужно). При падении на них гравитационной волны шарики будут то несколько сближаться, то удаляться. Измеряя изменение расстояния между ними, можно обнаружить волны тяготения. А почему нельзя обойтись одним шариком? — может спросить читатель.

Дело заключается в следующем. Если на шарик не действуют никакие посторонние силы, то он находится в поле гравитационной волны в состоянии невесомости. На шарике не ощущается никаких сил тяготения, и поэтому невозможно обнаружить проходящую гравитационную волну. Ситуация точно такая же, как у космонавтов в кабине космического корабля на орбите. Находясь в невесомости, они не могут обнаружить и тем более измерить гравитационное поле. Два шарика, находясь на некотором отдалении, подвергаются воздействию поля чуть-чуть по-разному, и между ними возникает относительное движение. Вот это относительное движение и можно измерить. В случае электромагнитных волн для их обнаружения не обязательно брать даже шарик — существуют разные типы электромагнитных антенн. В случае же гравитационных волн придуманы тоже разные конструкции гравитационных антенн.

Но все выглядит относительно просто только теоретически. На самом деле в сколь-нибудь привычных для нас условиях возникающие гравитационные волны крайне слабы: они должны излучаться при ускоренных движениях массивных тел. Но даже при движении небесных тел излучение гравитационных волн ничтожно. Так, при движении планет в Солнечной системе излучается гравитационная энергия, равная мощности всего лишь сотни электрических лампочек. Хотя это число и может показаться большим по нашим земным меркам, оно ничтожно по сравнению, скажем, с мощностью светового излучения Солнца, которое в сто тысяч миллиардов миллиардов раз больше (число записывается единицей с двадцатью тремя нулями). Попытки же создать лабораторные излучатели гравитационных волн пока и вовсе обречены на неудачу.

Скажем, можно сделать излучатель гравитационных волн в виде быстро вращающегося стержня. Если взять стальную болванку длиной 20 метров, массой 500 тонн и раскрутить ее до предела на разрыв центробежными силами (частота вращения при этом около 30 герц), то она будет излучать всего одну десятитысячную миллиардной миллиардной доли эрга в секунду.

Приведенные примеры показывают, насколько трудны попытки обнаружения гравитационных волн. В прямых экспериментах на Земле эти волны пока не обнаружены, хотя в разных лабораториях мира построены и строятся уже десятки гравитационных антенн, предназначенных для приема волн тяготения из космоса. Пионером этой работы был американский экспериментатор Д. Вебер в конце 50-х — начале 60-х годов. У нас в стране работа по созданию гравитационных антенн наиболее интенсивно ведется в Московском университете под руководством В. Брагинского.

Хотя, как уже сказано, с помощью антенн на Земле пока гравитационные волны не обнаружены, однако некоторые астрономические наблюдения прямо показывают, что гравитационные волны излучаются при движении небесных тел. Что же это за наблюдения?

Дело заключается в следующем. Как мы уже знаем, при движении планет или, например, движений звезд в двойных звездных системах излучаются гравитационные волны, уносящие энергию. Эти потери энергии обычно очень малы. Но чем больше масса движущихся небесных тел и меньше расстояние между ними, тем интенсивнее излучение. Потери энергии в системе двойной звезды приводят к постепенному сближению звезд и уменьшению периода их обращения вокруг центра масс. Конечно, это происходит крайне медленно, и тем не менее с помощью

специальных способов наблюдения такое уменьшение периода в одном случае удалось зафиксировать, причем в точном согласии с предсказаниями теории Эйнштейна. Мы не будем здесь рассказывать об астрономических наблюдениях подробнее, так как это увело бы нас далеко в сторону.

Вернемся к движению тела вокруг черной дыры по круговой орбите. При этом будет происходит излучение гравитационных волн и постепенное уменьшение радиуса орбиты. Так будет продолжаться до тех пор, пока радиус не примет критического значения трех гравитационных радиусов. На меньших расстояниях, как мы знаем, движение уже неустойчиво. Следовательно, тело, достигнув критической орбиты, сделав еще несколько оборотов и излучив некоторое количество энергии, «свалится» с этого расстояния в черную дыру.

Какое общее количество энергии излучит тело в виде гравитационных волн за все время, пока оно двигалось вокруг черной дыры по окружности с медленно уменьшающимся радиусом? Излучение происходит, как мы видели, крайне малоинтенсивно, но сам процесс этот длится долго! Таким образом, полное количество излученной энергии будет велико. Чтобы показать ее, приведем такое сравнение. Известно, что при ядерных превращениях, например, водорода в гелий или в еще более тяжелые элементы, определенная доля массы превращается в энергию. Максимально во всех видах реакций эта доля может составить около одного процента. В случае же излучения гравитационных волн при движении вокруг черной дыры излучается энергия в шесть раз больше!

Мы видим, что в принципе даже таким простейшим способом можно было бы использовать черные дыры как источник энергии. Конечно, практически такая машина почти бесполезна. Дело в том, что гравитационные волны крайне слабо взаимодействуют с веществом. Поэтому выделяющуюся в виде гравитационных волн энергию было бы очень трудно уловить и использовать для практических нужд: гравитационные волны рассеивались бы в космическом пространстве. В дальнейшем мы увидим, что существуют другие способы использования гигантской гравитационной энергии черных дыр.

Черные дыры и свет

Мы уже знаем, что поле тяготения влияет на свет. Оно заставляет фотоны менять свою частоту и искривляет траекторию лучей. Чем ближе к черной дыре, тем сильнее искривление траектории. На рисунке 4 приведены пути лучей света,

исходящих с разных расстояний от черной дыры (перпендикулярно к ее радиусу). Мы видим, что существует критическая окружность с радиусом в полтора гравитационных радиуса. (О ней мы уже упоминали в предыдущем разделе.) По этой окружности фотон, удерживаемый на окружности мощным тяготением черной дыры, вполне может двигаться. Однако это движение неустойчиво. Малейшее возмущение — и он либо упадет на черную дыру, либо улетит в космос.

Наличие критической окружности для фотонов ведет к тому, что свет, проходящий достаточно близко к черной дыре, будет ею гравитационно захвачен (это изображено на рисунке 5). Луч, подходящий вплотную к окружности размером в полтора гравитационных радиуса, неограниченно навивается на нее, а подходящий еще ближе упирается в черную дыру.

При движении около черной дыры меняется и частота колебаний световых волн. Чем ближе фотоны к черной дыре, тем сильнее возрастает частота колебаний. При удалении от черной дыры частота колебаний световых волн уменьшается. На значительном расстоянии от черной дыры эти изменения невелики и значительны только вблизи сферы Шварцшильда.

«Черные дыры не имеют волос»

До сих пор мы говорили только о черных дырах, возникающих при сжатии сферических тел и обладающих поэтому сферически симметричным полем тяготения. А какая черная дыра возникает при сжатии не сферического, например сплюснутого, тела? Мы пока будем говорить, только о невращающихся телах, оставив вопрос о вращении до следующего раздела.

Итак, до сжатия тело имело не сферическое гравитационное поле. Означает ли это, что возникнет сплюснутая черная дыра со сплюснутым полем тяготения? Долгое время ответ на этот вопрос был неизвестен, и эту задачу решили лишь сравнительно недавно. На самом деле никаких сплюснутых или других несимметричных черных дыр существовать не может. Дело в том, что в ходе сжатия, когда размеры тела приближаются к гравитационному радиусу, происходит интенсивное излучение гравитационных волн. Оказывается, что при этом все отличия поля тяготения от строгой сферичности уменьшаются и «излучаются» в виде гравитационных волн.

В первый момент после возникновения черная дыра имеет действительно искаженную, сплюснутую форму. Но эта дыра не может сохраняться постоянно во времени. Подобно тому, как

пленка мыльного пузыря, если бы мы его растянули, а потом отпустили, быстро принимает сферическую форму, точно так же граница «искаженной» черной дыры быстро принимает гладкую сферическую форму. Все «лишнее» излучается в виде гравитационных волн. В результате возникает совершенно сферически симметричная черная дыра с совершенно сферически симметричным внешним полем тяготения Шварцшильда, которое характеризуется только одной величиной — массой тяготеющего центра.

Таким образом, черные дыры могут быть и большие (массивные) и маленькие, но во всем остальном они совершенно подобны друг другу. Возникает тогда вопрос, а что будет, если сжимающееся тело обладало электрическим зарядом, то есть имело вокруг себя, помимо гравитационного, еще электрическое, или магнитное или, наконец, какое-либо еще поле? Будет ли возникшая из этого тела черная дыра также обладать этими полями?

Исследование вопроса привело к крайне интересному выводу. Оказалось, что все виды физических полей в ходе релятивистского коллапса будут излучены или погребены в самой черной дыре. Исключение составляет только поле электрического заряда. При сжатии оно, так же как и сферическое гравитационное поле, вовсе не меняется и остается вокруг возникшей черной дыры.

Итак, при релятивистском коллапсе сколь угодно сложного невращающегося тела, окруженного электрическим магнитным и другими полями, возникает черная дыра со свойствами, полностью характеризуемыми всего двумя параметрами — массой, от которой зависит сила внешнего гравитационного поля, и электрическим зарядом, характеризующим электрическое поле. Все другие отличительные особенности материи, которая образовала черную дыру, как бы исчезают. Никакие измерения или опыты над черной дырой не помогут ответить на вопрос, возникла ли она, например, из вещества или антивещества, обладало ли вещество магнитным полем и т. д. И это свойство «забывания» всех признаков определяется опять же тем, что никакие сигналы из черной дыры во внешнее пространство не выходят.

Если мы оставим в стороне явление электрического заряда, которое несущественно для небесных тел, то в качестве характеристики, определяющей свойства черной дыры, остается только ее масса. Все черные дыры одинаковой массы являются точными копиями друг друга. Такая безликость черных дыр послужила поводом уже знакомому нам американскому физику-

теоретику Д. Уилеру сказать, что «черные дыры не имеют волос».

Установление факта безликости было трудной задачей. Здесь тоже была и своя предыстория и история, как и при теоретическом предсказании черных дыр.

Упомянем лишь о двух работах, выполненных в середине 60-х годов. При создании первой я был лишь свидетелем, а во второй принимал участие сам. Первая работа была сделана советским физиком академиком В. Гинзбургом. Он рассматривал вопрос о том, каково будет магнитное поле звезды, если ее сжимать до все меньших размеров. Оказалось, что если звезду сжать почти до гравитационного радиуса и на этом остановиться, то вблизи самой поверхности звезды магнитное поле необычно возрастет. При дальнейшем сжатии точно к гравитационному радиусу напряженность магнитного поля у поверхности стремилась бы к бесконечности! Но это абсурд! Я помню, с каким подъемом и волнением рассказывал В. Гинзбург об этом в Астрономическом институте имени П. К. Штернберга, а потом с каким энтузиазмом специалисты обсуждали эти выводы. Значение работы было огромно. Ведь если предположение о наличии магнитного поля у черной дыры ведет к абсурду (а так получилось!), значит, никакого магнитного поля у черной дыры не может быть вовсе! Все магнитное поле должно быть излучено или погребено внутри дыры!

Это был очень неожиданный вывод, с которым специалисты не сразу освоились.

Вторая работа касалась возможности возникновения сплюснутой черной дыры. Я тогда только что окончил учебу и работал в группе, созданной академиком Я. Зельдовичем. Поскольку на протяжении уже нескольких лет меня волновала проблема сплюснутой черной дыры, я рассказал о ней моему руководителю, а заодно и моему сверстнику, тоже начинавшему работать во вновь созданной группе, А. Дорошкевичу. Все трое мы всесторонне начали исследовать проблему. Стиль работы у нас был разный, и, удачно дополняя друг друга, мы выполнили большой объем работ.

Вскоре обнаружилось, что, если бы возникла сплюснутая, как репа, или, наоборот, вытянутая, как огурец, черная дыра, то сплюснутость или вытянутость ее должны были бы быть бесконечными! Это означает, например, что в случае сплюснутости длина экватора черной дыры была бы бесконечной. Но это, конечно, абсурд! Отсюда мы сделали вывод, что никаких сплюснутых или вытянутых дыр быть не может. Все отклонения от сферичности должны, излучаясь в виде гравитационных волн, исчезать!

Обе упомянутые работы отличает одна общая черта: мы пришли к выводу, что поля должны излучаться в ходе возникновения черной дыры. Такой вывод покажется чрезмерно смелым. Ведь сам процесс излучения мы не рассчитывали, мы этого тогда еще просто не могли делать, так как не был создан соответствующий математический аппарат. Но вывод о результате процесса излучения был абсолютно надежен потому, что иной вел бы к абсурду. Это интересный пример того, как можно делать надежные заключения о последствиях явления, рассчитать которое не было возможности. Только шесть лет спустя американский теоретик Р. Прайс, а затем и многие другие провели расчеты самого процесса излучения полей. Они, естественно, полностью подтвердили правильность наших заключений.

Следствием расчетов Р. Прайса и других авторов было установление любопытного факта: все поля, которые в принципе могут быть излучены, излучаются действительно в ходе возникновения черной дыры. Только два вида их никогда не излучаются — это сферическое поле тяготения и сферическое поле электрического заряда (если таковой есть). Именно они остаются у возникшей черной дыры. Еще об одном исключении сказано в следующем разделе.

Среди физиков известны «законы Чизхолма». Они в шуточной, форме отражают далеко не шуточные трудности, возникающие при проведении физических экспериментов и при работе со сложными физическими приборами. Первый из «законов Чизхолма» читается так: «Все, что может испортиться, — портится». По аналогии с этим, Р. Прайс сформулировал свой вывод так: «Все, что может излучиться, — излучается».

В начале этого раздела мы специально оговаривали, что рассматриваем черные дыры, возникающие только из невращающихся тел. Эта оговорка не случайна. Дело в том, что вращающееся тело при коллапсе приводит к вращающейся черной дыре. Как мы увидим в следующем разделе, вращение приводит к определенным изменениям в поле тяготения и поэтому служит третьим (и последним) параметром (помимо массы и электрического заряда), который характеризует черную дыру.

Гравитационный вихрь вокруг черной дыры

По теории Ньютона, гравитационное поле никак не зависит от движения вещества. Так, поля тяготения неподвижного шара и вращающегося совершенно одинаковы, если только одинаковы их массы. По теории Эйнштейна, это не так: поля тяготения

рассматриваемых шаров будут несколько отличаться. В чем же оно заключается?

Наиболее наглядно (но несколько упрощенно) можно себе представить это отличие, как если бы вокруг вращающегося тела возникало добавочное вихревое гравитационное поле, увлекающее за собой все тела в круговое движение. Дело происходит таким образом, как будто слои пространства медленно вращаются вокруг такого тела, причем угловая скорость их вращения зависит от расстояния: она мала вдали и нарастает с приближением к вращающемуся телу. Для обычных небесных тел эти эффекты ничтожно малы. Проще всего их обнаружить, помещая вблизи вращающегося тела гироскоп. Если тело не вращается, то гироскоп будет указывать неизменное направление в пространстве по отношению к далеким звездам. (Широко известно использование гироскопов, например, для ориентации космических кораблей.) Однако вблизи вращающегося тела гироскоп медленно поворачивается.

Так, вблизи поверхности вращающейся Земли гироскоп поворачивается примерно на десятую долю угловой секунды в год. Конечно, такая ничтожная скорость поворота гироскопа не может помешать ориентации космических кораблей. Более того, экспериментально этот эффект пока и не обнаружен.

У поверхности нейтронных звезд, о которых мы уже говорили в главе 1, угловая скорость вращения гироскопа может быть весьма большой, всего лишь в несколько раз меньше скорости вращения самой нейтронной звезды. А сами нейтронные звезды могут вращаться со скоростью в несколько десятков и более оборотов в секунду. Таким образом, гироскоп вблизи такой быстро вращающейся звезды может совершать много оборотов в секунду! Что будет происходить с этой вихревой компонентой поля тяготения при релятивистском коллапсе звезды?

Оказывается, она не будет изменяться так же, как не меняется и сферическое поле тяготения.

Вихревое поле тяготения звезды полностью определяется величиной, которую физики называют моментом импульса тела. Для обычной звезды эта величина примерно равна произведению скорости вращения на экваторе, массы звезды и ее радиуса.

Таким образом, при коллапсе вращающегося тела возникает вращающаяся черная дыра. Что означает вращение черной дыры? Оно означает наличие вокруг черной дыры вихревого поля тяготения, оставшегося после коллапса, или, как его иногда называют, гравитационного вихря. Чем ближе к черной дыре, тем сильнее вихревое поле.

К чему это приводит?

Прежде всего вращение несколько сплющивает черную дыру у полюсов, подобно тому как вращение сплющивает Землю и звезды. Напомним, что без вращения форма дыры была бы точно сферической. Но не это главное. Без вращения гравитационная сила обращалась в бесконечность на сфере Шварцшильда. Эта сфера и была границей черной дыры, или, как говорят физики, горизонтом, из-под которого ничто вылетать не может. При наличии вращения это не так. Тяготение обращается в бесконечность вне горизонта, на поверхности, получившей название границы эргосферы. Положение этой границы показано на рисунке 6. Она отстоит тем дальше от границы черной дыры, чем быстрее вращение, но далеко от нее отойти не может.

На границе эргосферы и под ней уже никакая сила не может удержать проникшее туда постороннее тело в покое. Оно будет увлекаться вихревым полем в движение относительно черной дыры. Однако в отличие от тел, находящихся под сферой Шварцшильда (в отсутствие вращения), где они неудержимо падали к центру, здесь, под границей эргосферы, все тела вовлекаются во вращательное движение вокруг, черной дыры. При этом они вовсе не обязательно двигаются к центру: могут и приближаться к черной дыре, и удаляться от нее, могут пересекать границу эргосферы, двигаясь и внутрь и наружу.Спрашивается, как же гравитационная сила действует на них под границей эргосферы, если уже на границе величина ее равна бесконечности?

Здесь мы должны напомнить то, что уже говорили при обсуждении силы тяготения, действующей на поверхности Шварцшильда.

Сила тяготения бесконечна на границе только для неподвижного тела, а если тело движется ускоренно, то сила будет иная. При круговом движении вокруг черной дыры в том же направлении, что и направление вращения черной дыры, сила и на границе эргосферы, и внутри ее оказывается конечной. Поэтому тело может внутри границы эргосферы двигаться по окружности, не падая на центр. Таким образом, при наличии вращения предел статичности (то есть граница области, где возможен покой тела по отношению к черной дыре) резко отличается от сферы Шварцшильда в случае отсутствия вращения.

Мы видим, что граница эргосферы вовсе не является границей черной дыры, раз из-под этой поверхности можно выйти наружу. Посмотрим, что же будет при дальнейшем приближении к черной дыре.

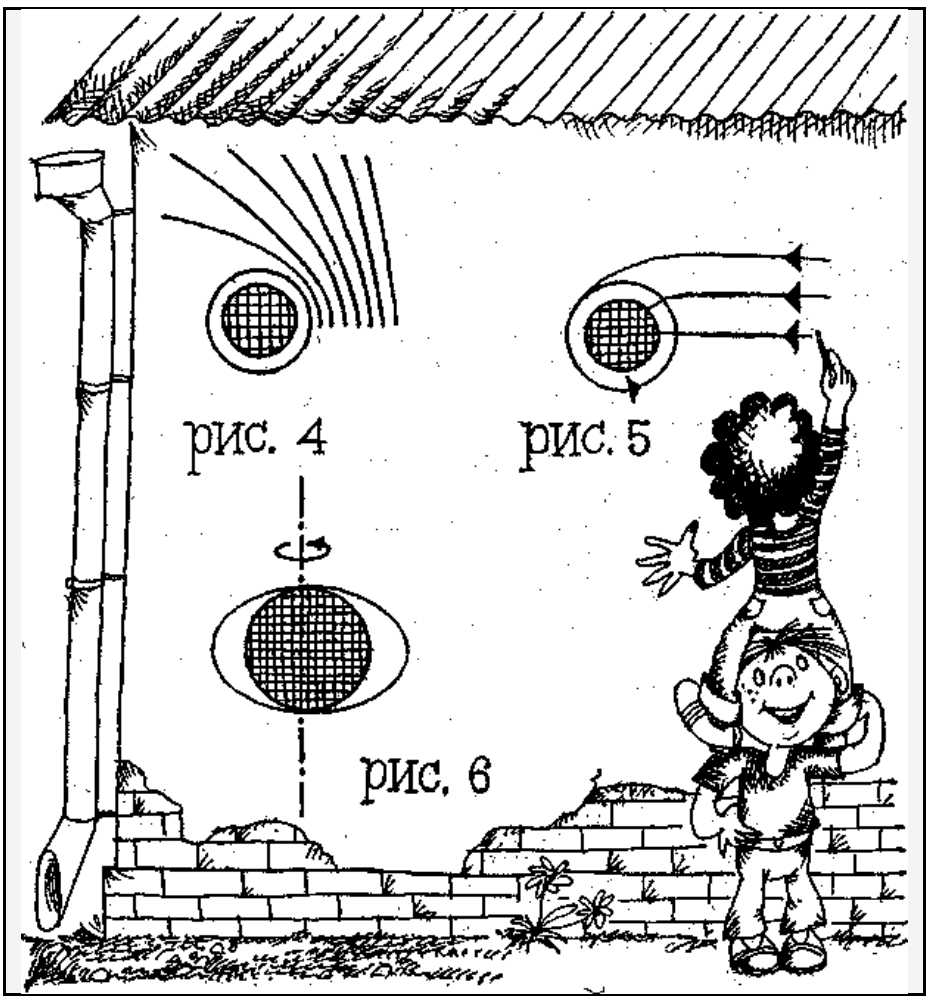
Продвигаясь вглубь, мы достигаем наконец границы черной

дыры — горизонта. На этой поверхности и под ней тело (и любые частицы, и свет) движется только внутрь черной дыры. Здесь движение наружу невозможно, и никакая информация не может выйти к внешнему наблюдателю из-под этого горизонта.

Именно пространство между горизонтом и пределом статичности и называют эргосферой. Там сила тяготения заставляет все тела кружить вокруг черной дыры.

Если медленно приближать гироскоп к поверхности эргосферы, его угловая скорость вращения будет все увеличиваться, стремясь на самой поверхности к бесконечности (для неподвижного гироскопа).

Как же для внешнего наблюдателя будут протекать события при падении какого-либо тела с большого расстояния к вращающейся черной дыре?



Падая на черную дыру, тело сначала отклонится в своем движении в сторону ее вращения, пересечет границу эргосферы и постепенно приблизится к горизонту. На горизонте все тела имеют одну и ту же угловую скорость обращения, в какое бы место поверхности горизонта ни попало падающее тело. Это очень важное свойство вращающейся черной дыры. В самой эргосфере угловая скорость движения тел может быть разной, но, попадая на поверхность черной дыры, они имеют уже одинаковую угловую скорость, вращаются вместе с поверхностью черной дыры, как бы прилепленные к поверхности вращающегося твердого тела.

Для внешнего наблюдателя получаемый от них свет быстро становится все более красным, и менее интенсивным, затем полностью затухнет, и они станут невидимыми для; внешнего наблюдателя: что происходит под горизонтом, он не видит: Если же сам наблюдатель, будет свободно падать во вращающуюся черную дыру, то он за конечное время достигнет горизонта, как в случае невращающейся дыры, и будет продолжать падать внутрь. Оставим пока этого наблюдателя и вернемся во внешнее пространство — в окрестность черной дыры.

Вращение черной дыры не может быть сколь, угодно большим. Дело в том, что она не сможет возникнуть, если тело вращалось слишком быстро. Действительно, при сжатии тела, достаточно быстро вращающегося, на экваторе возникают центробежные силы, которые препятствуют его сжатию в плоскости экватора. Тело может продолжать сжиматься только вдоль полюсов. Но тогда оно превратится в «блин» радиусом, много большим гравитационного радиуса, и, следовательно, никакой черной дыры не возникнет. Максимально возможным вращение черной дыры станет тогда, когда скорость вращения точек ее экватора будет равна скорости света.

У вращающейся черной дыры меняются и законы небесной механики. Так, вспомним явление гравитационного захвата тел черной дырой. Если дыра вращается, то легче всего ею будут захватываться частицы, которые вблизи черной дыры летят в сторону, противоположную вращению, и с гораздо большим трудом — частицы, летящие мимо черной дыры в сторону вращения. Наглядно можно себе представить это так, как если бы вихревая компонента гравитационного поля вокруг черной дыры действовала бы подобно праще — ускоряя и отбрасывая тем самым частицы, движущиеся мимо черной дыры в ту же сторону, что и закручивающийся вихрь этого поля, и, наоборот, тормозя и захватывая частицы, движущиеся против вихря.

Еще один пример изменения законов небесной механики. В

случае обращения тела по круговой орбите вокруг максимально быстро вращающейся черной дыры в виде гравитационных волн может излучиться в семь раз больше энергии, чем при движении вокруг невращающейся черной дыры.

Глава III.
Энергия из гравитационной бездны

Бездонные черные дыры

Мы уже неоднократно говорили, что излучение гравитационных волн телом, кружащимся около черной дыры, является способом получения энергии. Но это не есть способ извлечения энергии из самой черной дыры, а только энергии, связанной с кружащимся телом. Ведь в конце концов само тело (и часть гравитационных волн) падает в черную дыру, не извлекая, а увеличивая ее массу, а значит, и энергию.

Возникает вопрос: а нельзя ли придумать какой-нибудь процесс, уменьшающий массу черной дыры и тем самым черпающий ее энергию?

На первый взгляд этого сделать нельзя, ибо из черной дыры ничто не выходит, значит, из-под горизонта нельзя навлечь энергию. Это верно. Но мы упустили в этом рассуждении, что часть энергии (а значит, и массы) вращающейся черной дыры, связанная именно с вращением, находится, образно говоря, вне черной дыры и заключена в вихревой компоненте ее поля. Вот эту «вращательную» часть энергии и можно, оказывается, отнять от черной дыры, уменьшив ее массу. Как это сделать?

Представим себе следующий эксперимент. В эргосферу большой вращающейся черной дыры попадает ракета с выключенными двигателями. Она движется вокруг черной дыры в сторону ее вращения. Вблизи черной дыры пилот включает реактивные двигатели, выбрасывающие струи газов. Можно так изменить движение ракеты, что газы упадут в черную дыру, а ракета, ускорившись, с огромной скоростью вылетит из эргосферы, как бы выброшенная «пращой» гравитационного вихря. Огромная скорость ракеты будет намного превышать ту скорость, с которой ракета подлетала к эргосфере, и будет намного больше, чем изменение скорости, вызванное кратковременной работой двигателя. Что же произошло?

Вспомним, что вокруг черной дыры существует вращательный гравитационный вихрь. Ракетный двигатель заставил перейти ракету на такую новую орбиту, где она, подхваченная этим вихрем, была вышвырнута с огромной скоростью из эргосферы. Энергия, унесенная ракетой, получена от вихря, то есть от «вращательной» энергии черной дыры. Вращение черной дыры при этом уменьшается. Соответственно становится меньше и

полная масса черной дыры (на величину, унесенную ракетой). Этим-то способом и можно «черпать» энергию из вращающейся черной дыры.

Столь необычный процесс был открыт английским физиком-теоретиком Р. Пенроузом. Но черпаемая при этом только «вращательная» энергия находится, как подчеркивалось, в вихревом поле вне черной дыры.

Что же касается площади горизонта, а она и характеризует размеры самой черной дыры, то описанный процесс приводит к некоторому ее увеличению, так как газы из двигателя ракеты, упавшие в черную дыру, вносят в нее дополнительную массу и увеличивают тем самым ее размеры.

Наибольшее количество «вращательной» энергии черной дыры ракета может унести (при одинаковой продолжительности работы ее двигателей) в том случае, когда двигатели включаются у самого горизонта. В этом случае площадь горизонта не меняется (такие процессы получили название обратимых). Подобные включения двигателя на горизонте можно повторять многократно, и таким образом можно отнять у черной дыры «вращательную» энергию, не меняя ее собственного размера.

Что же касается вопроса о возможности уменьшения размеров горизонта в каких-либо процессах, то на него надо ответить отрицательно. Оказалось, что площадь горизонта черной дыры никогда не уменьшается ни в каких процессах. Если же взаимодействуют друг с другом несколько черных дыр, то сумма площадей их горизонтов не уменьшается.

Это очень важное свойство. Из него, например, следует, что ни при каких воздействиях черная дыра не может разделиться на две черные дыры. Если бы такое произошло, то при сохранении энергии сумма площадей горизонтов возникших дыр должна была бы быть меньше площади исходной черной дыры. Следовательно, как бы ни раздирали черную дыру приливные гравитационные силы, какими бы другими способами мы на нее ни воздействовали, «разодрать» ее на части нельзя.

Сливаться же черные дыры могут. Например, две движущиеся навстречу друг другу черные дыры сталкиваются «лоб в лоб» и сливаются в одну. При этом возникающая черная дыра будет иметь площадь горизонта больше суммы площадей горизонтов сталкивающихся дыр.

Итак, никакие процессы не уменьшают размеры черных дыр.

Черные дыры после своего возникновения являются как бы бездонными пропастями, которые нельзя никак уменьшить, нельзя ничем заполнить и нельзя ничем «заткнуть» — они являются вечными «дырами» в пространстве и времени,

способными только увеличиваться за счет падающего в них вещества. Это все растущие гравитационные бездны...

На самом деле, как мы увидим в дальнейшем, все это не столь мрачно. Во-первых, черные дыры, находящиеся в реальных условиях, благодаря своему огромному полю тяготения способны вызвать весьма бурные процессы, а, во-вторых, квантовые процессы (которых мы до сих пор не касались) вносят коррективы в нарисованную здесь картину. Но об этом подробнее будет сказано дальше.

Гравитационная бомба

До сих пор, рассматривая процессы вокруг черной дыры и способы извлечения из нее энергии, мы убедились, что эту энергию можно извлечь либо в форме излучения гравитационных волн, либо в виде кинетической энергии тел, выбрасываемых из эргосферы. Но оказывается, существуют еще более удивительные и неожиданные способы использования черных дыр как генераторов энергии.

Представим себе, что вращающаяся черная дыра облучается электромагнитными волнами. Что при этом будет происходить? На первый взгляд ничего интересного. Часть волн будет гравитационно захватываться черной дырой и навсегда в ней исчезать. Остальные, проходящие вблизи черной дыры, искривят свои траектории и уйдут дальше. Изменение направления распространения волн называют рассеянием. Рассеянные электромагнитные волны, уйдя вдаль от черной дыры, будут иметь ту те частоту, какую они имели, когда приближались к ней. Конечно, Частота волн при движении вблизи черной дыры в сильном гравитационном поле менялась. Когда волны двигались к черной дыре, их энергия увеличивалась, частота возрастала — волны испытывали фиолетовое смещение. Затем, при удалении от черной дыры, они испытывали красное смещение, и в итоге вдали от черной дыры их частота возвращалась к исходному значению.

Итак, общая картина получается следующей: при облучении черной дыры часть электромагнитных волн попадает в нее, а часть рассеивается с той же частотой, которая была до рассеивания. Из-за того, что часть их навсегда захватывается черной дырой, интенсивность рассеянных волн меньше, чем первоначальная интенсивность облучающего пучка.

Пока все выглядит тривиально. Но возможна, оказывается, ситуация, когда интенсивность рассеянных электромагнитных волн будет больше, чем облучающих. Для этого необходимо, во-первых, чтобы черная дыра вращалась, ибо только вращательная

энергия может от нее отбираться. Во-вторых, необходимо, чтобы частота электромагнитных волн, облучающих черную дыру, была меньше частоты вращения черной дыры. В таком случае рассеянные электромагнитные волны будут более интенсивными, чем падающие. Этот процесс усиления получил название суперрадиации. Он был открыт академиком Я. Зельдовичем. Суперрадиация, по существу, аналогична ранее рассмотренному нами процессу увеличения энергии тела, выбрасываемого из эргосферы и отнимающего «вращательную» энергию черной дыры (при суперрадиации также отнимается «вращательная» энергия черной дыры). Следует отметить, что при облучении вращающейся дыры электромагнитными волнами усиление их не очень велико: максимум всего на 4,4 процента.

Явление суперрадиации проявляется при облучении черной дыры не только электромагнитными волнами, но и другими видами излучений. Так, будут усиливаться, например, низкочастотные гравитационные волны, падающие на вращающуюся черную дыру. Причем условие возникновения суперрадиации для всех видов излучений одно и то же — достаточно малой должна быть частота волн. Коэффициент усиления для различных видов излучений оказывается различным. Так, для гравитационных волн он составляет 138 процентов, то есть гораздо больше, чем для электромагнитного излучения.

Но вернемся к электромагнитным волнам.

Окружим вращающуюся черную дыру искусственной сферой, отражающей электромагнитные волны. Пусть внутри этой сферы имеется хотя бы ничтожное количество электромагнитных волн, для которых выполнено условие возникновения суперрадиации. Эти волны, падая на черную дыру, усиливаются и уходят вдаль от черной дыры. Здесь они встречают отражающую сферу, отражаются и снова устремляются к черной дыре, где вновь усиливаются. Процесс повторяется снова и снова, а энергия усиливающегося излучения лавинообразно нарастает.

Если в отражающей сфере сделать отверстие, то часть усиливающихся волн будет через него выходить наружу, и тем самым наша установка станет генератором электромагнитного излучения, в котором «вращательная» энергия черной дыры непосредственно трансформируется в электромагнитное излучение.

Допустим теперь, что никакого отверстия в отражающей сфере нет и вся сфера полностью отражает усиливающееся электромагнитное излучение. Тогда процесс роста электромагнитной энергии внутри такой установки будет

катастрофически продолжаться, пока давление излучения не разорвет отражающую сферу, то есть произойдет взрыв. Подобная конструкция была названа гравитационной «бомбой».

Отметим, что создание подобных гравитационных конструкций, генерирующих электромагнитную энергию, сейчас совершенно немыслимо, так как мы не способны создавать искусственно черные дыры путем сверхсильного сжатия вещества, а естественные находятся, как увидим, очень далеко в космосе.

За краем гравитационной бездны

До сих пор мы говорили о процессах вокруг черной дыры. Обратимся теперь к самому захватывающему и интригующему: попробуем подойти к границе черной дыры — к краю этой бездонной пропасти (ее нельзя ничем заполнить) и попытаемся заглянуть внутрь.

Впрочем, мы знаем, что слово «заглянуть» здесь неуместно. Увидеть, что происходит внутри черной дыры невозможно, даже достигнув ее границы. Для этого необходимо последовать внутрь черной дыры. В принципе это возможно, например, при простом свободном падении (находясь в космическом аппарате) в поле тяготения черной дыры. За конечное собственное время такого падающего наблюдателя он достигнет горизонта и будет продолжать падать дальше.

Но мы уже знаем, что такое путешествие будет иметь для космонавта самые серьезные последствия. Ведь из черной дыры ничто не возвращается, ничто не выходит во внешнее пространство. Никогда не сможет вернуться и космонавт, какой бы мощностью ни обладали ракетные двигатели его аппарата. Он не сможет также и послать нам какое-либо сообщение о своих наблюдениях (хотя и может продолжать получать сообщения от нас). И тем не менее в принципе такое путешествие возможно. Что же ждет его внутри черной дыры?

Прежде чем отправиться вместе с космонавтом, вспомним еще одно гравитационное явление, хорошо всем известное. Речь идет о приливных гравитационных силах. Эти силы проявляются потому, что все тела, находящиеся в поле тяготения, имеют некоторые размеры. А поля тяготения всегда неоднородны, и разные точки притягиваемых тел испытывают несколько различную силу тяготения.

Пусть тело находится в поле тяготения планеты. Точки тела, находящиеся ближе к планете, будут испытывать более сильное тяготение, чем точки, отстоящие дальше. Эта разность сил тяготения и называется приливной силой, стремящейся

растянуть, разорвать тело. Приливная сила тем больше, чем резче меняется поле тяготения отточки к точке. Такая «разностная» сила проявляется и при свободном падении тела, и при покое. В этом отношении она резко отличается от действия самого тяготения, которое не проявляется в состоянии свободного падения.

Разумеется, в обычных условиях, скажем, в кабине космического корабля, летящего вокруг Земли, приливные силы ничтожны, незаметны. Незаметны они и для обычных тел на поверхности Земли. Но они пропорциональны размерам тел. Поэтому проявляются (и весьма заметно) для всей Земли, подвергающейся тяготению со стороны Луны. Рассматриваемые силы вызывают приливы в океанах, откуда и произошло их название,

Но вернемся к наблюдателю, падающему в черную дыру. Поместим сначала его на поверхность звезды, которая находится в состоянии релятивистского коллапса. Противоборствующие силы давления вещества звезды при этом практически уже не оказывают никакого сопротивления нарастающей гравитации, поверхность звезды пересекает гравитационный радиус и продолжает сжиматься дальше. Процесс остановиться не может, и за короткий промежуток времени (по часам наблюдателя на поверхности звезды) эта поверхность сожмется в точку, а плотность вещества станет бесконечной. Достигается, как говорят физики, сингулярное состояние. Чем оно характеризуется?

Не вдаваясь в тонкости, ответим на этот вопрос так: при приближении к сингулярности приливные гравитационные силы стремятся к бесконечности. Это означает, что любое тело (в том числе и наш воображаемый наблюдатель) будет разорвано. То же самое ожидает и любое тело, падающее в черную дыру уже после сжатия звезды, оно также достигает сингулярности. Можно ли как-нибудь избежать падения в сингулярность, если тело уже находится под горизонтом?

Оказывается, нет. Падение в сингулярность неизбежно. Как бы космонавт ни маневрировал на своей ракете, как бы ни были мощны двигатели, ракета быстро упадет в сингулярность.

Самое «долгое» время, которое ракета может просуществовать внутри черной дыры после пересечения горизонта, равно примерно времени, за которое свет проходит расстояние, равное размеру черной дыры. Это короткий миг. Для дыры с массой в десять масс Солнца максимально «долгое» время существования равняется всего одной стотысячной доле секунды.

Чтобы просуществовать это максимально «долгое» время, космический корабль должен осуществить следующий маневр.

При падении в черную дыру нужно включить на полную мощность двигатель при подлете к горизонту так, чтобы почти остановиться у самого горизонта. После этого необходимо выключить двигатель и дать кораблю свободно падать вдоль радиуса (от горизонта до сингулярности). Время такого падения и будет максимальным временем существования. Любые попытки космонавтов как-то затормозить с помощью включения двигателя падение внутрь черной дыры или попытки направить корабль в орбитальное движение приведут только к тому, что корабль упадет в сингулярность за более короткий промежуток времени (по часам космонавта).

Как же так может быть? — спросит читатель. Ну, хорошо, согласимся, что работа двигателей не в состоянии побороть огромную силу тяготения внутри черной дыры и остановить ракету, но все же торможение должно хоть немного замедлить падение, сделать его более продолжительным? И уж тем более это торможение не ускорит падения!

И тем не менее внутри черной дыры это возможно. Дело в том, что, включая двигатели, космонавт разгоняет свою ракету (назовем ее А) по отношению к свободно падающей ракете (ракета Б). Но на разгоняющейся ракете, как мы напоминали, время течет медленнее. А внутри черной дыры этот фактор оказывается решающим. Ракета А все равно падает в сингулярность. Но из-за того, что часы на ней шли существенно медленнее с точки зрения ракеты В, то и весь процесс падения занял по часам А меньше времени. Идя медленнее, часы А «натикают» меньше секунд (или долей секунды), то есть с точки зрения этих часов падение было менее продолжительным! Вот такой парадокс.

Вернемся теперь к проблеме приливных сил тяготения. Давайте сравним приливные силы, которые действуют на космонавтов в кабине космического корабля на орбите вокруг Земли и на космонавта, падающего в черную дыру.

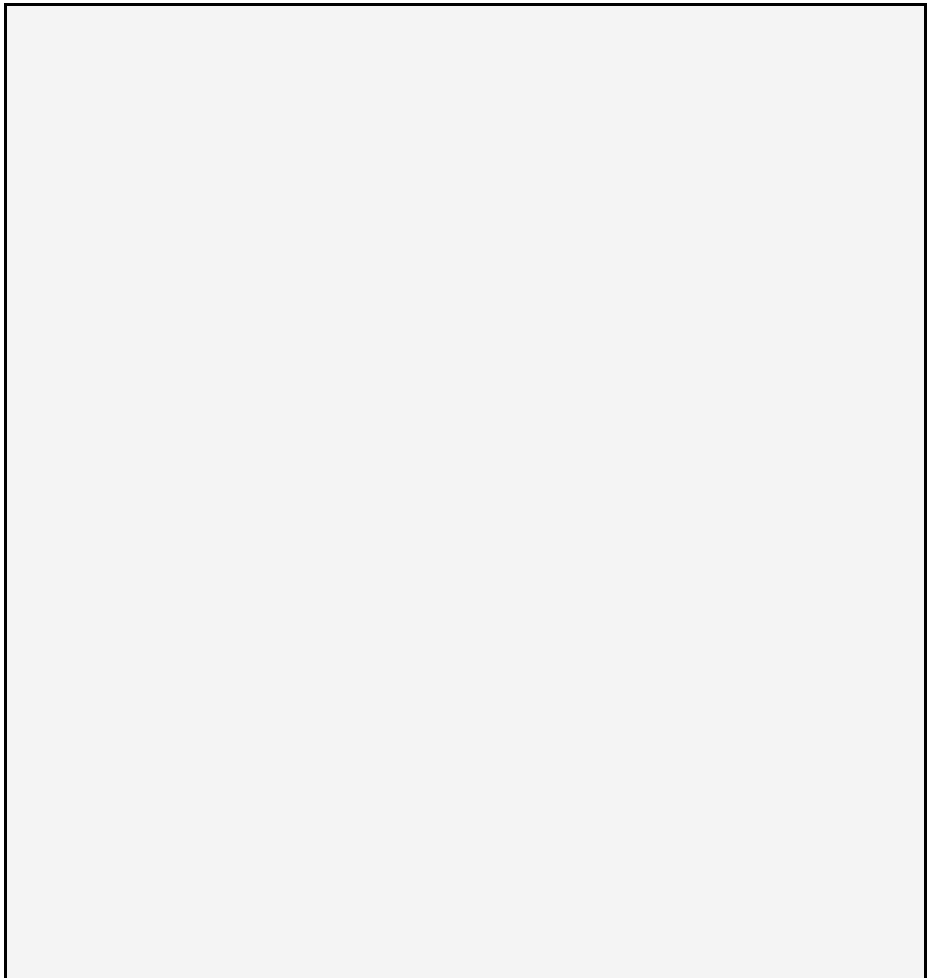
В первом случае приливные силы растягивают тело космонавта совершенно незаметным образом, их действия соответствуют давлению одной десятимиллиардной доле атмосферы.

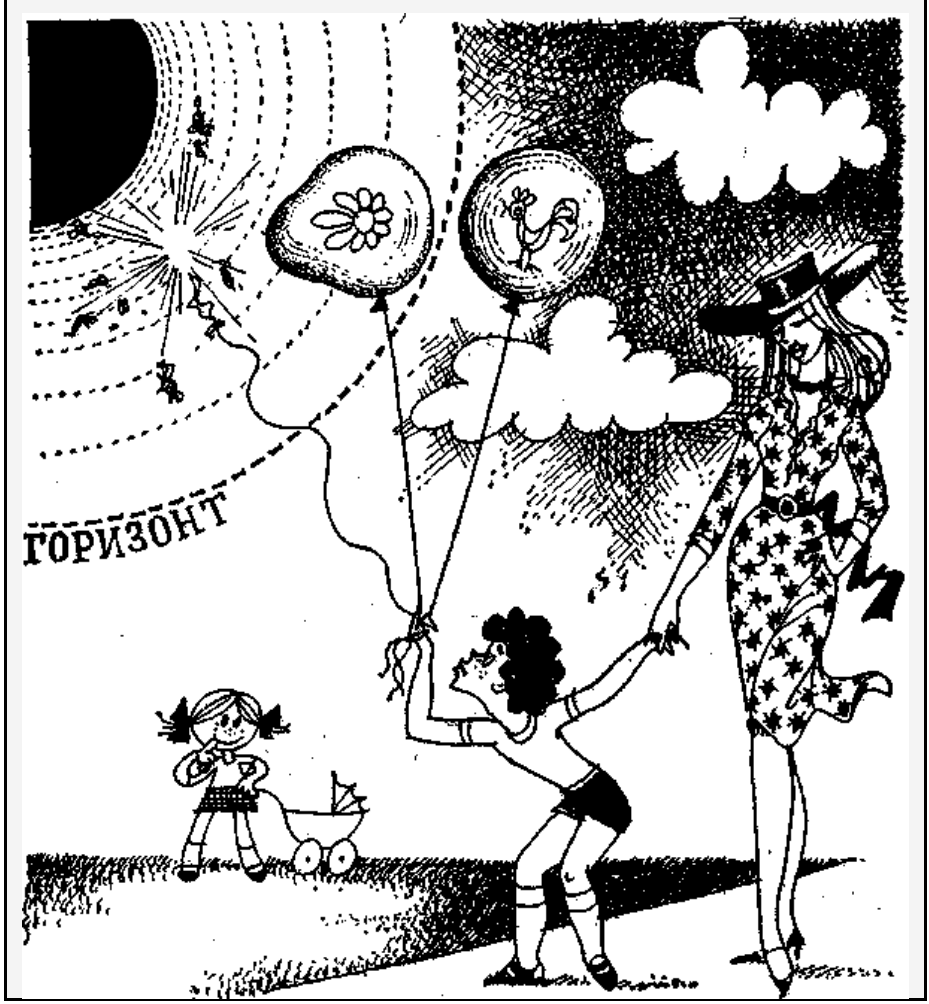
При падении же в черную дыру эти силы огромны даже еще на ее границе. Оказывается, чем меньше масса и размер дыры, тем больше приливные силы на горизонте. Для дыры с массой в тысячу масс Солнца приливные силы соответствуют давлению ста атмосфер. Такие нагрузки человеческое тело уже выдержать не может. Для меньших черных дыр приливные силы на границе еще больше...

Следовательно, если черная дыра имеет массу меньше тысячи солнечных, то человек, приблизившись к ней, не может остаться в живых.

Разумеется, при падении космического корабля даже в очень большею черную дыру, на границе которой человеку не угрожает опасность быть разорванным приливными силами, корабль в конце концов начнет неудержимо падать к сингулярности, а тогда неограниченно нарастающие приливные силы все равно рано или поздно разорвут любое тело. Таким образом, не желая кончать жизнь самоубийством, космонавт не станет по собственной инициативе проникать в черную дыру.

Мы рассмотрели столь ужасный мысленный эксперимент, чтобы показать суть основного явления, возникающего внутри черной дыры, — безудержный рост приливных сил, заканчивающихся сингулярностью. Почему это так важно?





Дело в том, что в окрестности самой сингулярности огромные приливные силы приводят к изменению физических законов, установленных в условиях, далеких от столь экстремальных. Мы познакомимся с некоторыми из них во второй части книги. Сейчас только скажем, что в сингулярности пространство и время не только «искривляются» сильнейшим образом, но и утрачивают, вероятно, свой непрерывный характер, распадаются на отдельные неделимые более промежутки — кванты. Мы не будем детальнее останавливаться на этом, во-первых, потому, что читатель и так, наверное, устал от попыток представить себе столь необычные вещи, а, во-вторых, потому, что теоретики еще сами толком не знают точно, что там происходит. Это самый передний край гравитационной науки.

Но уже то, что достоверно известно о «внутренности» черной

дыры, крайне интересно.

Эти знания — плод большой и сложной работы многих теоретиков в разных странах мира.

Одна из самых больших трудностей состояла в том, чтобы выяснить, что происходит внутри черной дыры в реальном случае, а не в какой-то идеализированной ситуации. Чем отличается случай реальный от идеализированного? К идеализации теоретики прибегают для того, чтобы упростить уравнения, которые они решают. Например, предполагали, что сжимается идеально сферическая без малейший отклонений от шаровой формы звезда. Для такой идеализированной задачи уравнения неизмеримо проще, чем в общем случае. Их удалось решить и исследовать «внутренность» возникающей сферической черной дыры. Но даже после получения решения потребовались десятилетия, чтобы физики окончательно осознали структуру этой «внутренности».

А в действительности звезда никогда не может быть идеально сферической. В ходе сжатия отклонения от сферичности нарастают. Что будет в этом случае? Прямые методы решения уравнений здесь помочь не могли. Общих решений уравнений нет. Для получения ответа потребовалось настоящее математическое остроумие.

Когда знакомишься с подобного рода работами, всегда остается загадкой: как можно додуматься до столь необычного пути решения вопроса? Очень хорошо об этом сказал открыватель законов планетных движений И. Кеплер: «Пути, которыми люди проникают в суть небесных явлений, представляются мне почти столь же удивительными, как и сами эти явления».

Первый успех был достигнут английским теоретиком Р. Пенроузом. Он показал, что при сжатии реального несферического тела внутри образовавшейся черной дыры неизбежно возникает сингулярность, то есть область с бесконечными приливными силами тяготения.

Невозможность избежать возникновения сингулярности внутри черной дыры, как показал Р. Пенроуз, следует, по существу, из факта невозможности начертить на бумаге карту всей сферической Земли так, чтобы все точки, близкие на поверхности Земли, были близки и на карте. Мы знаем, что на единой карте мира мыс Дежнева, например, и Аляска часто изображаются на противоположных концах карты, а в действительности они рядом. Вот к этому хорошо знакомому факту Р. Пенроуз остроумно и свел доказательство.

Но обязательно ли все тела, упавшие в реальную черную дыру, упадут и в сингулярность? Много теоретиков пыталось

разобраться в этом. Мы начинали решать эту проблему вместе с А. Дорошкевичем в середине 70-х годов, затем работали над ней с молодым физиком А. Старобинским и американскими теоретиками. Теперь этот вопрос в основном исчерпан — удалось доказать, что падение в сингулярность неизбежно.

Напомним еще раз, что о всех событиях, протекающих внутри черной дыры, наблюдатель, оставшийся вне ее, знает, так сказать, только теоретически. Он не может получить о них никаких сведений, никаких сигналов из-под горизонта черной дыры. Вот как поэтично говорит об этом знаменитый индийский физик, живущий в США, лауреат Нобелевской премии С. Чандрасекхар: «Исследуя явления, связанные с горизонтами событий и невозможностью передавать через них информацию, я часто повторял про себя сказку о природе, которую слышал в Индии лет пятьдесят назад. Сказка эта называлась «Не потерялась, а просто исчезла» и повествовала о личинках стрекоз, живущих на дне пруда. Их постоянно мучила одна загадка: что происходит с ними, когда, став взрослыми, они поднимаются к поверхности пруда, проходят через нее и исчезают, чтобы больше никогда не вернуться? Каждая личинка, ставшая взрослой и готовящаяся подняться наверх, обязательно обещает вернуться и рассказать оставшимся внизу подругам о том, что же происходит наверху. Ведь только так удастся подтвердить или опровергнуть слухи, распространенные лягушкой: будто бы личинка, пересекающая поверхность пруда и оказавшаяся по другую сторону привычного мира, превращается в удивительное существо с длинным стройным телом и сверкающими крыльями. Но, выйдя из воды, личинка превращается в стрекозу, которая, увы, не может проникнуть под поверхность пруда, сколько бы она ни пыталась и как бы долго ни парила над его зеркальной поверхностью. И в летописи, которую ведут личинки, нет ни одной строки о личинке, которая возвратилась бы и рассказала, что же происходит с теми, которые пересекали границу их мира. И сказка оканчивается жалобой: «Неужели ни одна из нас, хотя бы из жалости к тем, кого мы бросили внизу, не вернется и не раскроет секрет?»

Нет ничего проще и сложнее, чем черные дыры

Итак, мы познакомились с физикой черных дыр, с тем, что происходит в их окрестностях и что может происходить внутри самих дыр. Читатель, наверное, согласится с тем, что черные дыры — совершенно исключительные объекты, не похожие ни на что, известное до сих пор. Это не тела в обычном смысле слова и

не излучение. Это дыры в пространстве и времени, возникающие из-за очень сильного искривления пространства и изменения характера течения времени в стремительно нарастающем гравитационном поле.

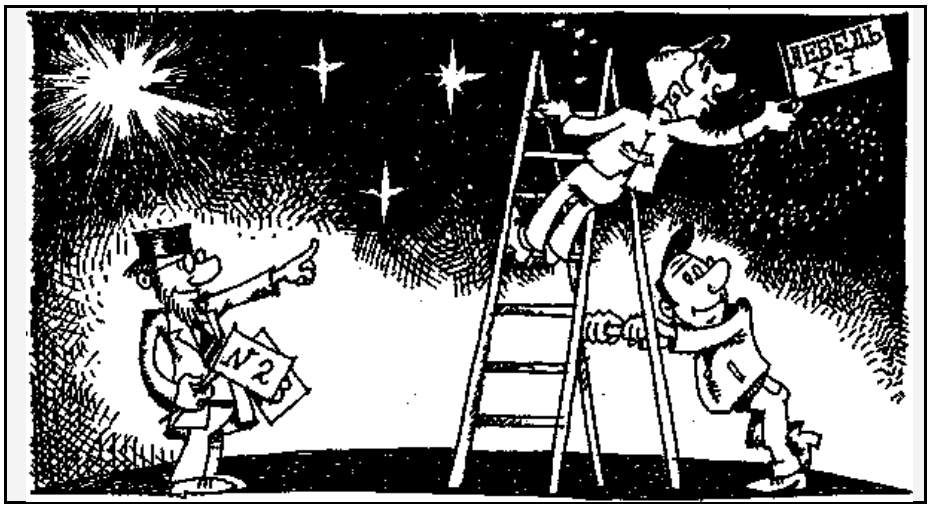
В предыдущих разделах мы в то же время показали, что черные дыры являются в некотором смысле и очень простыми объектами. Их свойства никак не зависят от свойств сколлапсировавшего вещества, от всех сложностей строения вещества, его атомной структуры, находящихся в нем физических полей, не зависят от того, было ли вещество водородом или железом и т. д. При образовании черной дыры для внешнего наблюдателя все свойства сколлапсировавшего тела как бы исчезают, они не влияют ни на границу черной дыры, ни на что другое во внешнем пространстве, остается только гравитационное поле, характеризуемое лишь двумя параметрами — массой и вращением (как мы уже говорили, присутствие глобального электрического заряда несвойственно небесным объектам). Этим определяются и форма черной дыры, и ее размеры, и все остальные ее свойства. Так что с полной определенностью можно сказать, что нет ничего проще черной дыры: человеческое тело, например, несравненно сложнее, — его двумя числами, как черную дыру, не охарактеризуешь.

По поводу такой удивительной простоты черных дыр американский физик Кип Торн как-то воскликнул: «Представьте себе, что мы могли бы судить о всех особенностях характера женщины только те ее весу и цвету волос!»

Но и нет ничего белее странного, чем черная дыра — ведь человеческое воображение даже не в состоянии представить себе, до какой степени происходит искривление пространства и изменение течения времени, что в них возникает дыра. Изучение физики черных дыр позволяет расширить наши познания о фундаментальных свойствах пространства и времени. Как мы увидим в дальнейшем, в окрестности черных дыр возникают, например, квантовые процессы, обнаруживающие сложнейшую структуру так называемого физического вакуума. Еще более мощные (катастрофически мощные) квантовые процессы происходят внутри самой черной дыры (в окрестности сингулярности). Экспериментальное открытие черных дыр в природе было бы чрезвычайно важным для естествознания. Мы смогли бы изучать новые законы, управляющие свойствами пространства и времени в сильных гравитационных полях, новые законы, управляющие движением материи в необычных условиях. Образно говоря, черные дыры — это дверь в новую, широчайшую область, нашего познания физического мира.

Но насколько реальны черные дыры? Как мы уже говорили, искусственно их изготовить пока нельзя. Однако возможно, как оказалось, возникновение их во Вселенной естественным путем.

Глава IV.
Поиски черных дыр



Они должны существовать

То, что знают астрономы об эволюции звезд, приводит к неизбежному выводу: черные дыры должны возникать в конце жизни массивных небесных тел. Как же протекает их эволюция и почему следует столь определенный вывод?

Вещество обычной звезды, подобной нашему Солнцу, находится под действием двух противоположных сил — тяготения, стремящегося сжать звезду к центру, и давления раскаленных газов, стремящихся ее расширить. Их равенство обеспечивает устойчивое состояние звезды. Но горячая звезда непрерывно излучает энергию с поверхности, и если бы эта потеря не компенсировалась, то звезда потеряла бы свою тепловую энергию и стала бы сжиматься. Однако этого не происходит, ибо вблизи центра звезды, где температура достаточно велика, идут термоядерные реакции, сопровождающиеся выделением огромной энергии. При этом ядерное «горение» претерпевают сначала водород, гелий, а затем и более тяжелые элементы — углерод, кислород и т. д. Термоядерные реакции и являются источником энергии звезд, которую они излучают в пространство.

С течением времени исчерпывается запас ядерного горючего

в звезде. Продолжительность ядерного «горения» — этого активного периода жизни звезд — определяется скоростью потери энергии на излучение и запасами ядерного топлива. И то и другое зависит от массы звезды. Поэтому и продолжительность жизни звезды определяется ее массой. Звезды с массой, равной солнечной, живут около 10 миллиардов лет. Более массивные звезды живут меньше. Так, звезда массой 3 массы Солнца живет один миллиард лет, а звезда массой 10 масс Солнца всего 100 миллионов лет.

Когда исчерпается все ядерное топливо, звезда, продолжая терять энергию на излучение, постепенно сжимается. Если масса ее не превышает массу Солнца более чем в 1,2 раза, то сжатие закончится, когда радиус звезды составит несколько тысяч километров. Плотность вещества при этом может достигнуть 10^9 г/см^3. Такие звезды получили название белых карликов. Они уже давно известны астрономам.

После превращения в белый карлик звезда остывает, практически не уменьшая своих размеров. Давление газа, препятствующее дальнейшему сжатию белого карлика, обеспечивается квантовыми силами, возникающими между достаточно тесно упакованными электронами плазмы, составляющей звезду. Это давление в условиях звезды никак не зависит от температуры ее вещества. Поэтому белый карлик может полностью остыть и превратиться в черный карлик, не изменив своего размера.

Если масса звезды более 1,2 массы Солнца, то в ходе ее сжатия плотность вещества превысит 10^9 г/см^3. При такой плотности возникают ядерные реакции, поглощающие много энергии. Равенство сил тяготения и давления нарушается, и звезда начнет стремительно сжиматься.

В процессе этого сжатия может произойти ядерный взрыв, который мы наблюдаем как вспышку сверхновой. При этом звезда сбрасывает оболочку и превращается в так называемую нейтронную звезду. Силы тяготения сжимают ее настолько, что в центре звезды плотность становится сравнима с ядерной — 10^{14} - 10^{15} г/см^3.

Нейтронная звезда — это своеобразное атомное ядро поперечником в десяток километров. В такой звезде ядерные частицы — нуклоны — очень тесно прижаты друг к другу. Если ее масса не превосходит две массы Солнца, то нуклонный газ способен квантовыми силами воспрепятствовать дальнейшему сжатию звезды. Таково конечное состояние этой остывшей звезды. Правда, понятие холода к нейтронной звезде совершенно неприемлемо с точки зрения земных представлений. Ведь в столь

плотном газе тепло никак не должно сказываться на величине давления даже если температура газа сотни миллионов градусов. Поэтому-то, хотя астрофизики часто называют нейтронную звезду холодной, в ее центре температура может достигать сотен миллионов градусов, а на поверхности миллиона.

Долго искали астрономы нейтронные звезды, но безуспешно. И это вполне закономерно. Звезду радиусом 10 километров и с температурой миллион градусов можно увидеть только в самые крупные телескопы, если она к тому же достаточно близка к нам. Дело в том, что излучающая поверхность нейтронных звезд очень мала и они, как правило, испускают видимого света в миллион раз меньше вашего Солнца. Но если мы даже видим нейтронную звезду, остается вопрос, как отличить ее от обычных слабых звезд.

Нейтронные звезды пытались обнаружить по воздействию их тяготения на близлежащие звезды. В тесной двойной системе заметить слабую нейтронную невозможно — она тонет в ярком свете своей соседки. Однако нейтронные звезды имеют такую же массу, как и большинство других звезд. Астрономы стали искать в двойных системах звезды с нормальной массой, но очень низкой светимостью. Однако эти попытки не увенчались успехом.

Открыли нейтронные звезды совершенно случайно в 1967 году английские радиоастрономы, спустя 33 года после их теоретического предсказания. Оказалось, что вблизи поверхности нейтронных звезд, которые обладают сильным магнитным полем, есть активные области, излучающие направленные потоки радиоволн. Такая активная область вращается вместе с поверхностью звезды, излучает пучок направленных радиоволн, как вращающийся прожектор. Этот пучок бежит по небу, и, когда попадает на Землю, мы наблюдаем вспышки радиоизлучения, которые происходят через равные промежутки времени, соответствующие периоду вращения звезды. Эти вспышки и зарегистрировали английские радиоастрономы.

Вспышки радиоизлучения пульсаров — как назвали новые космические объекты — следовали с очень коротким периодом (около одной секунды и меньше). Такой период вращения может быть лишь у звезды, поперечник которой не больше нескольких десятков километров. Действительно, столь же быстро вращающаяся звезда с диаметром 1000 километров (например, белый карлик) будет просто разорвана центробежными силами, и только у маленькой нейтронной звезды столь быстрое вращение еще не превышает предела прочности. Так было доказано, что пульсары — это нейтронные звезды.

Пульсар — конечный этап активной жизни звезды не слишком большой массы, меньше примерно двух масс Солнца.

Но в реальной Вселенной звезду окружает межзвездный газ. Он попадает на звезду, разогревается при ударе о ее поверхность и испускает рентгеновские лучи. Если нейтронная звезда входит в двойную звездную систему и из атмосферы второй (нормальной) звезды истекает газ, то он может попадать в поле тяготения нейтронной звезды. В этом случае поток газа и интенсивность рентгеновского излучения становятся особенно велики. Такие «рентгеновские пульсары» также обнаружены в двойных системах.

Итак, существование нейтронных звезд убедительно доказано. Но расчеты показывают, что если звезда после исчерпания ядерного горючего, сжатия и возможных процессов сбрасывания внешних оболочек имеет массу, все еще превышающую критический предел, равный примерно двум солнечным массам, то даже действие огромных сил давления сверхплотного ядерного вещества все же не сможет остановить процесс сжатия, и превращение ее в черную дыру в конце эволюции становится неизбежным.

Правда, иногда высказывалась мысль, что, может быть, массивные звезды в конце эволюции выбрасывают в пространство большую часть своей массы, а остаток, обладающий массой меньше критической, превращается в белый карлик или нейтронную звезду. Но такой путь эволюции большинству ученых представляется крайне искусственным и маловероятным. Поэтому мы приходим к заключению, что черные дыры неизбежно должны возникать на поздних стадиях эволюции массивных звезд.

Могут ли во Вселенной существовать черные дыры другого, незвездного происхождения? Вероятнее всего, да. И мы в дальнейшем познакомимся с этими возможностями, часто весьма интересными и необычайными. Однако выводы о существовании незвездных черных дыр гораздо менее надежны, чем о неизбежности возникновения черных дыр в ходе эволюции массивных звезд. Более того, как мы увидим дальше, но крайней мере одна черная дыра звездного происхождения, вероятно, уже открыта астрономами. Вот почему мы пока отложим знакомство с другими незвездными черными дырами и обратимся к вопросу о поисках черных дыр звездного происхождения

Как искать черные дыры?

До начала 60-х годов, по-видимому, никто из астрономов серьезно и не пытался искать ни нейтронные звезды, ни тем более черные дыры. Молчаливо предполагалось, что эти объекты слишком эксцентричны и скорее всего представляют собой лишь выдумку теоретиков, О них даже предпочитали не говорить.

Иногда глухо упоминалось, что они, может быть, и могли образоваться, но, вероятнее всего, этого не происходит. И во всяком случае, если они есть, то их нельзя обнаружить.

Столь странные объекты нарушали привычную для астрономов картину Вселенной. По поводу черных дыр большинство астрономов вообще с сомнением покачивали головами. Даже общепринятого названия для этих объектов не было. Среди тех, кто не верил в возможность существования черных дыр, был астроном англичанин А. Эддингтон (1882 — 1944). Путь его в астрономию классический. Он начинал как астроном-наблюдатель в Гринвичской обсерватории, много занимался вопросами статистики звездных движений. В 1914 году стал директором обсерватории Кембриджского университета, и все его научные интересы сосредоточились на вопросах астрофизики, которая как раз в это время формировалась как самостоятельная наука.

Заслуги его в астрофизике трудно переоценить. Он первым понял основные процессы, которые определяют внутреннее строение звезд, выдвинул важнейшую идею о том, что энергия из глубоких недр звезды к поверхности переносится в основном путем медленного «просачивания» света сквозь непрозрачный газ, а не конвекцией; подобно кипящей воде в кастрюле на плитке. Еще в 1916 году, когда о ядерных реакциях не было и понятия, он показал, что источником энергии в звездах не может быть их постепенное сжатие с нагреванием, как тогда думали, а должны быть какие-то глубинные превращения материи, которые А. Эддингтон называл субатомными. Он занимался изучением пульсаций звезд, строением их атмосфер и многими другими проблемами астрофизики. А. Эддингтон одним из первых понял глубину и новизну общей теории относительности. Он руководил экспедицией, которая в 1919 году во время полного солнечного затмения впервые измерила отклонение лучей света в поле тяготения Солнца в полном согласии с предсказанием теории Эйнштейна. Его научные заслуги были общепризнаны: он был президентом Лондонского королевского астрономического общества, президентом Лондонского физического общества, президентом Международного астрономического союза, членом многих академий, в том числе и иностранным членом-корреспондентом АН СССР.

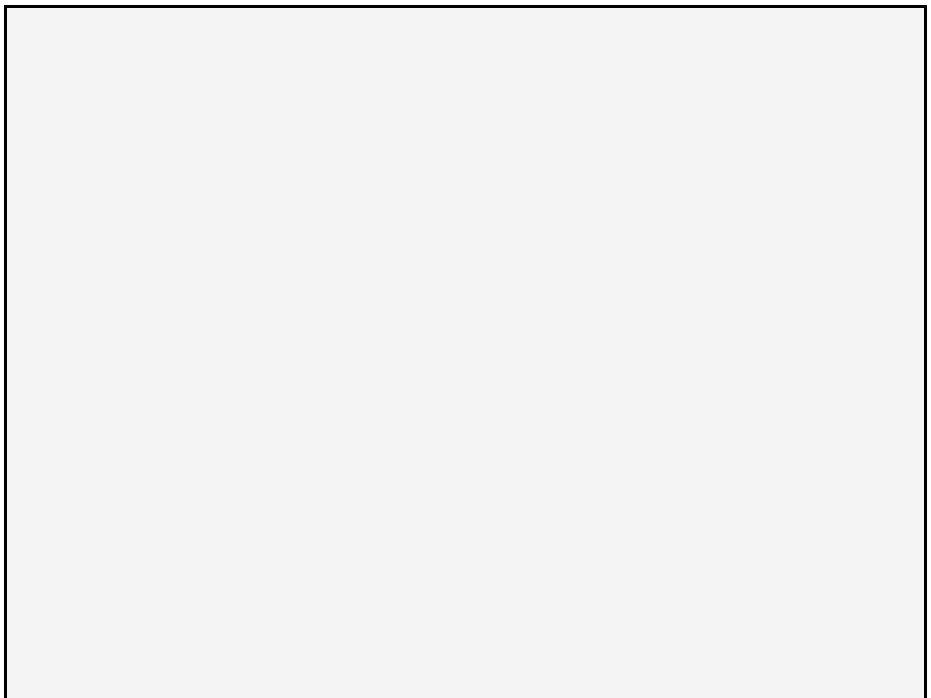
И вот этот человек не мог свыкнуться с мыслью о том, что достаточно массивная звезда должна в конце концов потерять устойчивость и испытать катастрофическое сжатие. Как пишет С. Чандрасекхар, А. Эддингтон считал невозможным коллапс звезды, в ходе которого «гравитация станет такой сильной, что удушит

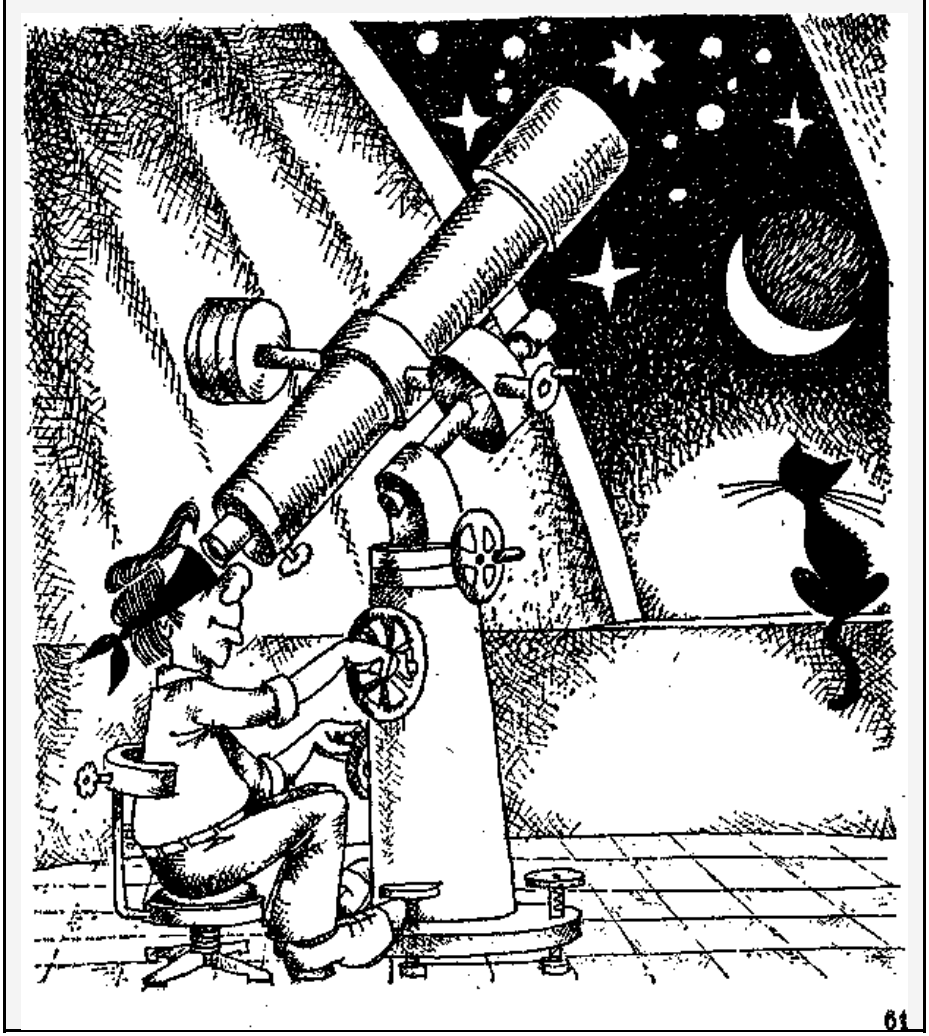
излучение», то есть возникнет черная дыра.

По мнению С. Чандрасекхара, резко отрицательная позиция столь авторитетного астронома задержала развитие релятивистской астрофизики на десятки лет. В чем здесь дело? Почему передовой и чуткий ко всему новому ученый не понял и не оценил столь важной идеи?

Наверное, прав советский астрофизик И. Шкловский, сказавший, что А. Эддингтон слишком любил звезды, которым он отдал всю свою жизнь (жизнь одинокого человека, респектабельного старого холостяка). Он построил теорию равновесия и устойчивости звезд, а тут такая катастрофа — коллапс... Этого не может быть, утверждал А. Эддингтон. Природа должна была «изобрести» какое-нибудь средство, предохраняющее космическую материю от такого жалкого конца! И. Шкловский справедливо заключает: «Не зря говорится, что наши недостатки есть продолжение наших достоинств».

Даже в гораздо более позднее время, в конце 50-х годов, когда я, учился в Московском университете на астрономическом отделении, никто из наших профессоров ни разу не сказал нам, во что превращаются массивные звезды после своей смерти. Может быть, какую-то роль здесь играло само понятие смерти, о которой не очень-то хочется и не принято обычно говорить. Вот и смерть звезд была своего рода «запретной темой для обсуждения в приличном обществе».





К тому же и экзотика черных дыр и сложность понятий общей теории относительности, не бывшей в чести у старшего поколения астрономов, играли свою роль.

Однако в 60-е годы ряд открытий заставил астрономов изменить свой взгляд на многие процессы во Вселенной. Были открыты активные ядра галактик и квазары, излучавшие энергию более мощно, чем тысячи миллиардов звезд, было обнаружено реликтовое радиоизлучение, оставшееся во Вселенной от первых мгновений начала ее расширения. После всего этого нейтронные звезды и черные дыры перестали казаться столь уж экзотическими объектами. И наконец, в 1967 году, как мы уже писали выше, были открыты нейтронные звезды — пульсары. Наступила очередь черных дыр. Но как их обнаружить? Ведь они не светят и не отражают свет?!

У астрономов, однако, уже был накоплен опыт изучения неизлучающих объектов. Таковы, например, темные пылевые туманности. Они видны как черные пятна на фоне звезд или светящихся газовых туманностей. Но пылевые туманности являются гигантскими по своим размерам объектами, а черные дыры звездного происхождения имеют в поперечнике всего-навсего десяток километров. И так как они возникают из массивных звезд, то ближайшая черная дыра должна быть расположена от нас на расстоянии порядка нескольких десятков световых лет. Следовательно, видимые угловые размеры такой черной дыры должны составлять 0,00000001 угловой секунды, и увидеть ее как темное пятнышко абсолютно невозможно.

Черная дыра должна отклонять проходящие мимо нее лучи света. Но чтобы этот эффект был достаточно заметен, взаимное расположение источника света (какой-либо еще более далекой звезды), черной дыры и наблюдателя должно быть подобрано столь специальным образом, что о случайной реализации этого события нечего и думать.

Остается использовать тот факт, что черные дыры обладают массами, равными массам больших звезд, а сами совсем не светят. Именно так подошли к поискам черных дыр в 1964 году советские астрофизики О. Гусейнов и Я. Зельдович. Они предложили искать черные дыры в составе двойных звездных систем, предположив, что есть системы, где одна звезда нормальная и светится, а другая представляет собой черную дыру. Оба объекта должны обращаться вокруг общего центра масс. Но черная дыра невидима, так что видимая компонента будет обращаться как бы вокруг «ничего».

Конечно, увидеть непосредственное орбитальное движение звезды с большого расстояния нельзя ни в какой телескоп. Однако можно использовать специальный метод, широко распространенный в астрофизике. Когда звезда, двигаясь по орбите, приближается к нам, линии в ее спектре смещаются в фиолетовую сторону, а когда удаляется, — в красную сторону. Астрономам давно известны так называемые спектрально-двойные звезды, двойственность которых была открыта с помощью описанного метода. В спектрально-двойных системах, состоящих из обычных звезд, если одна звезда движется к нам, а другая — от нас, линии будут смещены в противоположные стороны. Часто наблюдаются и периодические смещения линий в спектре только одной звезды, а линий в спектре второй не видно вовсе. Казалось бы, тут надо заподозрить наличие черной дыры. Однако в большинстве случаев это тривиально объясняется тем, что другая звезда хоть и светит, но заметно слабее первой; свет ее

тонет в свете яркой соседки, и только поэтому она не видна.

Советские астрофизики предложили искать потухшие звезды в таких спектрально-двойных системах, в которых масса невидимого спутника, вычисленная по наблюдаемому движению видимой звезды, оказалась больше массы видимой соседки. Это означало бы, что спутник-невидимка является не обычной, а потухшей звездой. Ибо если бы спутник был обычной звездой, то, превосходя по массе свою соседку, он и светил бы ярче ее, и не мог бы быть невидим.

Однако потухшая звезда может быть и белым карликом, и нейтронной звездой. Поэтому, чтобы из обнаруженных потухших звезд выделить именно черные дыры, надо было еще доказать, что масса невидимого спутника больше критической массы (две массы Солнца). Как мы уже знаем, масса белого карлика не может превышать 1,2 массы Солнца, а масса нейтронной звезды — 2 массы Солнца. Значит, если масса потухшей звезды больше критического значения и составляет, скажем, 5 солнечных масс, то это может быть только черная дыра.

Следуя этим указаниям, у нас в стране, а затем в США были предприняты поиски черных дыр в спектрально-двойных системах. Но эти попытки не привели к успеху. Во всех подозрительных спектрально-двойных системах удалось объяснить невидимость спутника естественным путем, не прибегая к черным дырам. Предложенный способ поиска оказался слишком трудным, так как «черноте», обнаруженной окольным путем, почти всегда можно придумать объяснение, почему она черна. Да и вообще, «невидимость» служит плохим доказательством существования чего-либо. Это звучит, подобно старой шутке о названии диссертации: «Отсутствие телеграфных столбов и проводов в археологических раскопках как доказательство наличия радиосвязи у древних народов».

Выяснилось к тому же, что указанный способ и в принципе вряд ли мог привести к успеху. Причина этого была связана с особым характером эволюции звезд в тесных двойных системах. Оказывается, в ходе, эволюции газ должен перетекать с одной звезды на другую, и в результате первоначально более массивная звезда, заканчивая свою эволюцию и превращаясь в черную дыру, передает часть массы менее массивной. В конце концов оказывается, что видимая звезда обладает массой, большей, чем масса первоначально возникшей черной дыры. У такой двойной системы нельзя определить, почему спутник невидим, — то ли он нормальная звезда, но светится слабее соседки (так как его масса меньше), то ли он — потухшая звезда и может быть черной дырой.

Необходимо было найти такие физические явления, в которых черная дыра проявляла бы себя активно и однозначно. И такое явление было найдено — это падение газа в поле тяготения черной дыры.

В межзвездном пространстве имеются обширные газовые туманности. Если черная дыра находится в такой туманности, газ будет падать в ее поле тяготения. В падающем газе, креме того, имеется магнитное поле, а в ходе падения развиваются турбулентные движения. Энергия магнитного поля газа в ходе падения должна переходить в тепло. «Нагретые» электроны, двигаясь в магнитных полях, излучают электромагнитные волны. Вблизи горизонта черной дыры вступают в игру эффекты общей теории относительности. Часть излучения захватывается черной дырой. Основная доля излучения, видимая далеким наблюдателем, уходит с расстояния в несколько гравитационных градусов. Так, еще на подлете к черной дыре, до того как провалиться в нее, нагретый газ излучает энергию в окружающее пространство. Может быть, это излучение достаточно для обнаружения черной дыры с большого расстояния?

Общее количество излучения (или, как говорят астрофизики, светимость) зависит от количества падающего газа. В типичных для межзвездной среды условиях светимость газа, падающего на черную дыру, того же порядка, что в светимость нормальных, не очень ярких звезд. Это значит, что найти таким способом черные дыры очень трудно. Они затеряны среди огромного количества слабых звезд Галактики. Правда, в падающем на черную дыру газе турбулентные движения приводят к быстрым колебаниям яркости с продолжительностью вспышек от сотых до десятитысячных долей секунды.

Советский астрофизик В. Шварцман именно таким способом предлагал в конце 60-х годов искать черные дыры. Он вместе со своими товарищами создал в специальной астрофизической обсерватории АН СССР целый комплекс приборов для этой цели под названием «Многоканальный анализатор наносекундных импульсов изменения яркости», или, сокращенно, МАНИЯ. Название оказалось символичным. Многие годы упорного труда по конструкции, созданию и отладке приборов, пробные наблюдения, наконец, поиски... В. Шварцман долго шел этим путем экспериментатора почти с маниакальным упорством. По ходу дела были выполнены интересные наблюдения разных небесных объектов. Но, увы, черные дыры так обнаружены и не были...

Черные дыры открыты?

В 1966 году был предложен еще один способ поиска черных дыр. Чтобы его разъяснить, ответим сначала на вопрос — почему светимость газа, падающего в черную дыру, относительно невелика?

Дело в том, что в межзвездном пространстве мала плотность газа, и, следовательно, его мало падает на черную дыру. А могут ли осуществляться в Галактике условия, когда газа падает гораздо больше?

Оказывается, да. Такие условия могут осуществляться, если, например, черная дыра входит в состав очень тесной двойной системы, где вторая компонента является нормальной звездой-гигантом. В этом случае газ из оболочки нормальной звезды под действием тяготения компаньона будет к нему перетекать мощным потоком. Мы уже говорили об этом процессе, когда обсуждали рентгеновские пульсары в двойных звездных системах.

Газ в такой двойной системе не сможет просто упасть на черную дыру: из-за наличия орбитального движения он закручивается, образуя вокруг черной дыры диск. Вследствие трения слоев газа происходит его разогрев до температуры 107 градусов (еще до того, как он провалится в черную дыру). При такой температуре газ испускает рентгеновские лучи.

Следовательно, черные дыры следует искать как рентгеновские источники в составе тесных двойных звездных систем, где они могут быть наряду с нейтронными звездами. Такое предсказание было сделано академиком Я. Зельдовичем и мной в 1966 году, вскоре после открытия первых рентгеновских источников. И. Шкловский, сделавший такое же предсказание в 1967 году, построил подробную астрофизическую картину процессов, которые должны происходить в источниках рентгеновских лучей в двойных звездных системах.

Для поиска рентгеновских источников на небе необходим вынос рентгеновских телескопов за пределы атмосферы, а для длительных наблюдений они должны быть установлены на искусственных спутниках, (полет ракеты ведь очень непродолжителен). С помощью такого телескопа, установленного на спутнике «Ухуру», были открыты в 1972 году рентгеновские источники в составе нескольких двойных звездных систем. Они-то и были подвергнуты подробному изучению, в частности, с помощью аппаратуры, установленной на советских спутниках и пилотируемых космических кораблях.

Так началась эра рентгеновской астрономии. Эта увлекательная ветвь науки заслуживает написания отдельной книги, и не одной, но нас сейчас интересуют рентгеновские источники в двойных звездных системах. Среди них были такие,

которые строго периодически меняли свою яркость с периодом около секунды. Они заведомо не могут быть черными дырами. Это вращающиеся нейтронные звезды, обладающие магнитным полем, магнитные полюса которых не совпадают с полюсами оси вращения звезды. Газ здесь падает на магнитные полюса вдоль магнитных силовых линий, и в результате возникает направленное рентгеновское излучение. Вращение же делает эти объекты как бы вращающимися рентгеновскими прожекторами. Но у черной дыры, как мы видели, нет каких-либо активных пятен на поверхности, и она не может приводить к явлению прожектора. Сгустки горячего газа в газовом диске вблизи черной дыры, вращаясь во внутренних областях, могли бы дать периодические вспышки. Однако довольно быстро этот период должен сильно измениться — ведь сгусток не жестко прикреплен к этому чему-то вращающемуся, — а из-за трения постепенно приблизиться к звезде (в результате период обращения уменьшается).

Таким образом, черные дыры должны находиться среди рентгеновских источников в двойных системах, не являющихся пульсарами. Отметим прежде всего, что эти источники не могут быть обычными звездами. Ведь для того чтобы газ нагрелся до температуры, достаточной для испускания рентгеновских лучей, гравитационное поле, в котором он движется, должно быть очень велико. Такими полями обладают только компактные (сжавшиеся) «умершие» звезды: белые карлики, нейтронные звезды или черные дыры. Но как выделить именно черные дыры среди «умерших» звезд?

Мы знаем, что надежным критерием этого является измерение массы. Если масса «умершей» звезды больше критического значения двух солнечных масс, то это черная дыра. Измерить же ее можно по орбитальному движению звезд в двойной системе. И вот оказалось, что из найденных двойных рентгеновских источников по крайней мере один обладает массой, значительно большей критического значения. Этот источник, расположенный в созвездии Лебедя, получил название Лебедь Х-1.

Нормальная видимая звезда в этой двойной системе является массивной звездой с массой около 20 солнечных масс. «Умершая» звезда, из окрестностей которой идет рентгеновское излучение, имеет массу около 10 солнечных масс. Это намного больше критического значения. Многочисленные новые исследования делают этот результат все более надежным. Мы можем поэтому с большой степенью достоверности сказать, что в системе, в которую входит источник Лебедь Х-1, вероятно, открыта первая черная дыра во Вселенной.

Рассмотрим несколько подробнее процессы, происходящие в этой системе. Компоненты двойной звезды обращаются вокруг центра масс с периодом 5,6 суток. Черная дыра массой около 10 солнечных масс притягивает к себе газ из атмосферы «нормальной» звезды-гиганта массой около 20 масс Солнца. Этот газ закручивается орбитальным движением, а центробежные и гравитационные силы сплющивают его в диск.

Струи газа из-за трения соседних слоев движутся вокруг черной дыры по сходящейся к центру спирали. Однако скорость движения к центру намного меньше, чем скорость движения по орбите. Только через месяц газ достигает внутреннего, ближайшего к черной дыре края диска. Здесь, как мы знаем, орбитальное движение становится неустойчивым, и газ сваливается в черную дыру.

За все время путешествия в диске газ нагревается трением: в наружных слоях диска его температура всего несколько десятков тысяч градусов, а во внутренних частях — больше 10 миллионов градусов. Общая рентгеновская светимость этого газа в тысячи раз превосходит полную (во всех областях спектра) светимость Солнца. Основная часть рентгеновского излучения, которая наблюдается на Земле, приходит из самых внутренних частей диска радиусом, не превышающим 200 километров. Размер самой черной дыры около 30 километров.

Еще одним важным доказательством того, что рентгеновское излучение в источнике Лебедь Х-1 рождается в очень малой области вблизи черной дыры, являются чрезвычайно быстрые хаотические колебания рентгеновского излучения, происходящие за тысячные доли секунды. Если бы излучающий объект был больше, он бы не мог столь быстро изменять свою яркость.

Таков этот удивительный источник рентгеновских лучей, находящийся от нас на расстоянии около 6 тысяч световых лет.

Со времени открытия источника Лебедь Х-1 прошло больше десяти лет. Он тщательно изучен. Почему же мы столь осторожно говорим о «вероятном» открытии черной дыры?

Предоставим слово американским специалистам Р. Блендфорду и К. Торну. «В обычной ситуации астрономы уверенно приняли бы этот результат, — говорят они, — но, поскольку в данном случае решается судьба первого открытия человеком черной дыры и поскольку твердые заключения иногда разрушаются своевременно не замеченными систематическими ошибками, астрономы проявляют осмотрительность. Пока не будет найдено дополнительное, независимое подтверждающее доказательство — доказательство скорее положительное, чем отрицательное, типа «чем же еще это может быть?» — они не

хотят делать вывод, что Лебедь X-1 — действительно черная дыра».

За прошедшие годы открыто еще два-три источника, подобных Лебедю X-1 и являющихся кандидатами в черные дыры. Но пока лишь кандидатами...

Сколько всего черных дыр в нашей Галактике? И есть ли опасность встречи с одной из них и падения в эту бездну?

Точно ответить на первый вопрос трудно, так как неизвестно, какая часть массивных звезд в конце жизни полностью разрушается в термоядерном взрыве в ходе коллапса, а в какой части их все же остается достаточно массивное ядро, сжимающееся в черную дыру. Большинство астрономов считают, что черных дыр в Галактике должно быть многие миллионы, если не миллиарды.

Что же касается второго вопроса, то читатель, наверное, сам уже ответил на него — опасности случайного столкновения с умершей массивной звездой нет никакой. Ведь звезды столь далеко находятся друг от друга в пространстве, что вероятность их столкновения совершенно пренебрежима. Тем более ничтожна вероятность столкновения с черной дырой, которая гораздо меньше по размеру звезды. К тому же в черные дыры превратилась только очень малая часть всех звезд в Галактике.

Гигантские черные дыры

До сих пор мы говорили о возникновении во Вселенной черных дыр звездного происхождения. Астрономы имеют все основания предполагать, что, помимо звездных черных дыр, есть еще другие дыры, имеющие совсем иную историю.

Как читатель уже знает, в начале 60-х годов нашего века были открыты необыкновенные небесные тела — квазары. Эти объекты находятся далеко за пределами нашей Галактики. Они необычайно мощно излучают энергию, их светимость иногда в сотни раз превышает светимость больших галактик. Уже само по себе это крайне интересно. Но астрономы были буквально поражены, когда им удалось установить, что основная энергия в квазаре излучается из области размером меньше одного светового года!

Для сравнения напомним, что поперечник Галактики — сто тысяч световых лет.

Как же удалось установить размеры квазаров? Ведь все они так далеки, что в любой телескоп выглядят как звездочки и непосредственно определить их размеры невозможно.

Советские астрономы Ю. Ефремов и А. Шаров решили эту

задачу косвенным путем. Они обнаружили, что квазар может резко менять свою яркость за время меньшее, чем один год. Одновременно к таким же выводам пришли американские наблюдатели. Значит, и размер квазара должен быть меньше одного светового года. В самом деле, если бы он был больше, то свет, вышедший из дальней от нас его части, пришел бы к нам более чем на год позже, чем от ближних частей. Поэтому даже при резком увеличении светимости квазара мы бы видели одновременно свет разной яркости от разных его частей: от переднего края мы видели бы яркий свет, а от дальнего слабее, так как он вышел более чем на год раньше, когда интенсивность квазара еще была слаба. Этот слабый свет смешивается в наших приборах с ярким от переднего края (а порознь их увидеть нельзя!), изменение яркости всего квазара смазывается, оно не резкое, поскольку растягивается во времени.

Значит, несмотря на то, что квазар удивительно маленький — всего лишь в тысячу раз больше, чем Солнечная система, — светит он как десять тысяч миллиардов Солнц! Такого не может быть — единодушно заключили астрономы (я помню эту фразу, сказанную с трибуны семинара одним известным московским астрономом, когда все ломали голову над загадкой квазаров). Но как «не может быть», когда этот «диковинный зверь» был прямо перед глазами астрономов.

Последовал целый каскад гипотез, большей частью экзотических. Известные астрофизики Джефри и Маргарет Бербидж писали тогда: «Существует так много противоречивых идей относительно теории и интерпретации наблюдений (квазаров), что по крайней мере 95 процентов из них неверны».

Сегодня единственным кандидатом, имеющим основание претендовать на роль «основного двигателя» в квазарах, осталась гигантская черная дыра с массой в сотни миллионов солнечных масс. Размер такой дыры — миллиард километров.

В течение прошедших десятилетий выяснилось, что квазары — это необычно активные излучающие ядра больших галактик. Часто в них наблюдаются мощные движения газов. Сами звезды галактики вокруг таких ядер обычно не видны из-за огромного расстояния и сравнительно слабого их свечения по сравнению со свечением квазара. Выяснилось также, что ядра многих галактик напоминают своего рода маленькие квазарчики и проявляют иногда бурную активность — выброс газа, изменение яркости и т. д., — хотя и не такую мощную, как настоящие квазары. Даже в ядрах совсем обычных галактик, включая нашу собственную, наблюдаются процессы, свидетельствующие о том, что и здесь «работает» маленькое подобие квазара.

То, что в центре галактики может возникнуть гигантская черная дыра, теперь кажется естественным. В самом деле, газ, находящийся в галактиках между звездами, постепенно под действием тяготения должен оседать к центру, формируя огромное газовое облако. Сжатие этого облака или его части должно привести к возникновению черной дыры. Кроме того, в центральных частях галактик находятся компактные звездные скопления, содержащие миллионы звезд. Звезды здесь могут разрушаться приливными силами при близких прохождениях около уже возникшей черной дыры, а газ этих разрушенных звезд, двигаясь около черной дыры, затем падает в нее.

Падение газа в сверхмассивную черную дыру должно сопровождаться явлениями, подобными тем, о которых мы говорили в случае звездных черных дыр. Только процессы эти несравненно более мощные. Кроме того, здесь должно происходить ускорение заряженных частиц в переменных магнитных полях, которые приносятся к черной дыре вместе с падающим газом.

Все это вместе и приводит к явлению квазара и к активности галактических ядер.

Итак, крайне вероятно, что существуют сверхмассивные черные дыры. Французский писатель Ж. Ренар как-то сказал: «Ученый — это человек, который в чем-то почти уверен». Но я в силу специфики своей науки астрономии воздержался бы от таких заключений и подвел бы итог сказанному следующей фразой: только дальнейшие наблюдения внесут ясность в этот вопрос.

Глава V.
Черные дыры и кванты

Пустая ли пустота?

Бум, связанный с черными дырами, начался в астрономии в конце 50-х — начале 60-х годов. Проходили годы, многое прояснялось в этой загадке. Стала ясна неизбежность рождения черных дыр после смерти массивных звезд; открыли квазары, в центре которых, вероятно, находятся сверхмассивные черные дыры. Наконец, в рентгеновском источнике в созвездии Лебедя обнаружили первую черную дыру звездного происхождения. Физики-теоретики разобрались с диковинными свойствами самих черных дыр, постепенно привыкли к этим гравитационным пропастям, могущим только заглатывать вещество, увеличиваясь в размере, и, казалось бы, обреченным на вечное существование.

Ничто не предвещало нового грандиозного открытия. Но такое открытие, изумившее видавших виды знатоков, грянуло как гром среди ясного неба.

Оказалось, что черные дыры вовсе не вечны! Они могут исчезнуть в результате квантовых процессов, идущих в сильных гравитационных полях. Нам придется начать рассказ несколько издалека, чтобы сделать более понятным суть этого открытия.

Начнем с пустоты. Для физика пустота вовсе не является пустой. Это не каламбур. Уже давно установлено, что

«абсолютной» пустоты, то есть «ничего, ничего», в принципе быть не может. Что же физики называют пустотой? Пустотой называют то, что остается, когда убирают все частицы, все кванты любых физических полей. Но тогда ничего не останется, скажет читатель (если он давно не интересовался физикой). Нет, оказывается, останется! Останется, как говорят физики, море нерожденных, так называемых виртуальных, частиц и античастиц. «Убрать» виртуальные частицы уже никак нельзя. В отсутствии внешних полей, то есть без сообщения энергии, они не могут превратиться в реальные частицы.

Лишь на короткий миг в каждой точке пустого пространства появляется пара — частица и античастица и тут же снова сливаются, исчезают, возвращаясь в свое «эмбриональное» состояние. Разумеется, наш упрощенный язык дает только некоторый образ тех квантовых процессов, которые происходят. Наличие моря виртуальных частиц-античастиц давно установлено прямыми физическими экспериментами. Не будем говорить здесь об этом, иначе мы бы неизбежно слишком отклонились от основной линии рассказа.

Чтобы избежать невольных каламбуров, физики называют пустоту вакуумом. Будем так делать и мы.

Достаточно сильное или переменное поле (например, электромагнитное) может вызвать превращение виртуальных частиц вакуума в реальные частицы и античастицы.

Интерес к подобным процессам теоретики и экспериментаторы проявляли давно. Рассмотрим процесс рождения реальных частиц переменным полем. Именно такой процесс важен в случае гравитационного поля. Известно, что квантовые процессы необычны, часто непривычны для рассуждений с точки зрения «здравого смысла». Поэтому, прежде чем говорить о рождении частиц переменным гравитационным полем, приведем простой пример из механики. Он сделает понятнее дальнейшее.

Представьте себе маятник. Его подвес перекинут через блок, подтягивая веревку или опуская ее, можно менять длину подвеса. Толкнем маятник. Он начнет колебаться. Период колебаний зависит только от длины подвеса: чем длиннее подвес, тем больше период колебаний. Теперь будем очень медленно подтягивать веревку. Длина маятника уменьшится, уменьшится и период, но увеличится размах (амплитуда) колебаний. Медленно вернем веревку в прежнее положение. Период вернется к прежнему значению, прежней станет и амплитуда колебаний. Если пренебречь затуханием колебаний вследствие трения, то энергия, заключенная в колебаниях, в конечном состоянии

останется прежней — такой, как била до всего цикла изменения длины маятника. Но можно так изменять длину маятника, что после возвращения к исходной длине амплитуда его колебаний будет меняться. Для этого надо подергивать веревку с частотой вдвое больше частоты маятника. Так мы поступаем, раскачиваясь на качелях. Мы опускаем и поджимаем ноги в такт нашим качаниям, и размах качелей все увеличивается. Конечно, можно и остановить качели, если подгибать ноги не в такт колебаниям, а в «противотакт».

Подобным же образом можно «раскачивать» электромагнитные волны в резонаторе. Так называется полость с зеркальными стенками, отражающими электромагнитные волны. Если в такой полости с зеркальными стенками и с зеркальным поршнем имеется электромагнитная волна, то, двигая поршень вперед и назад с частотой, вдвое больше частоты электромагнитной волны, мы будем менять амплитуду волны. Двигая поршень в «такт» колебаниям волны, можно увеличить амплитуду, а значит, и интенсивность электромагнитной волны, а двигая поршень в «противотакт», можно гасить волну. Но если двигать поршень хаотически — и в такт и в «противотакт», — то в среднем всегда получится усиление волны, то есть в электромагнитные колебания энергия «накачивается».

Пусть теперь в нашей полости — резонаторе имеются волны всевозможных частот. Как бы мы ни двигали поршень, всегда найдется волна, для которой движение поршня происходит в такт. Амплитуда и интенсивность этой волны возрастут. Но чем больше интенсивность волны, тем больше она содержит фотонов-квантов электромагнитного поля. Итак, движение поршня, изменяя размер резонатора, ведет к рождению новых фотонов.

После знакомства с этими простыми примерами вернемся к вакууму, к этому морю всевозможных виртуальных частиц. Для простоты мы будем говорить пока только об одном сорте частиц — о виртуальных фотонах — частицах электромагнитного поля. Оказывается, процесс, подобный рассмотренному нами изменению размеров резонатора, который в классической физике ведет к усилению уже имеющихся колебаний (волн), в квантовой физике может приводить к «усилению» виртуальных колебаний, то есть к превращению виртуальных частиц в реальные. Так, изменение гравитационного поля со временем должно вызывать рождение фотонов с частотой, соответствующей времени изменения поля. Обычно эти эффекты ничтожны, так как слабы гравитационные поля. Однако в сильных полях ситуация меняется.

Еще один пример: очень сильное электрическое поле

вызывает рождение из вакуума пар заряженных частиц — электронов и позитронов.

Вернемся из нашего краткого экскурса в физику пустоты к черным дырам. Могут ли рождаться частицы из вакуума в окрестностях черных дыр?

Да, могут. Это было известно давно, и в этом не было ничего сенсационного. Так, «при сжатии электрически заряженного тела и превращении его в заряженную черную дыру электрическое поле возрастает настолько, что рождает электроны и позитроны. Подобные процессы изучали академик М. Марков и его ученики. Но такое рождение частиц возможно и без черной дыры, надо лишь любым способом увеличить электрическое поле до достаточной величины. Ничего специфического для черной дыры здесь нет.

Академик Я. Зельдович показал, что рождаются частицы и в эргосфере вращающейся черной дыры, отнимая от нее энергию вращения. Такое явление подобно процессу, открытому Р. Пенроузом, о котором мы говорили в главе 3.

Все эти процессы вызываются полями вокруг черной дыры и приводят к изменению этих полей, но они не уменьшают саму черную дыру, не уменьшают размеры области, откуда не выходит свет и любое другое излучение и частицы.

Открытие Хоукинга

Сенсационное открытие было сделано в 1974 году английским теоретиком С. Хоукингом. В учебнике по гравитации американских физиков Ч. Мизнера, К. Торна и Дж. Уилера, вышедшем еще до упомянутого открытия, о работах С. Хоукинга сказано, что в них «проявляется не только огромная интуиция, глубина и разносторонность, но также и дар необыкновенной решимости в преодолении тяжелейших физических трудностей, в стремлении найти и понять истину». С. Хоукинг показал, что существует квантовый процесс рождения частиц самой черной дырой, ее гравитационным полем, приводящий к уменьшению массы и размера черной дыры. На первый взгляд это кажется удивительным. Ведь при образовании черной дыры все процессы на сжимающейся звезде быстро замедляются, «застывают» для внешнего наблюдателя, гравитационное поле везде становится неизменным во времени. А такое поле рождать частицы не может. Следовательно, если во время формирования черной дыры переменное поле произведет какое-то (очень малое) количество частиц, поток этих частиц от возникающей черной дыры, как и все процессы, будет очень быстро затухать по мере приближения

поверхности звезды к гравитационному радиусу. С. Хоукинг же утверждает, что это не так, поток не затухнет совсем, а будет продолжаться и после образования черной дыры. В чем же здесь дело?

Дело в том, что внутри черной дыры поле вовсе не застыло. Там неизменность во времени невозможна, все внутри дыры обязано двигаться, падать к центру. С этим обстоятельством и связан удивительный процесс, открытый С. Хоукингом. Мы помним, что в обычных условиях в вакууме виртуальные частицы на миг образуют пару частица — античастица, которые тут же сливаются. В поле тяготения черной дыры одна из возникших таким образом частиц может оказаться под горизонтом и будет неудержимо падать к центру, а другая останется снаружи. Теперь уже эта пара не сможет слиться ни через миг, никогда вообще. Частица, оказавшаяся снаружи, улетит в космос; унося с собой часть энергии черной дыры, а значит, и часть ее массы.

Таким образом, возникает квантовое излучение частиц черной дырой. Правда, этот процесс обычно крайне ничтожен. Согласно расчетам С. Хоукинга черная дыра излучает как обычное нагретое тело, но нагретое до очень небольшой температуры. Так, излучение черной дыры с массой в одну солнечную массу соответствует температуре одна десятимиллионная градуса. Это, конечно, ничтожное излучение. Длина волны возникающих фотонов соответствует размерам черной дыры в 10 километров. Потеря энергии на такое излучение полностью пренебрежима.

В реальных условиях сегодняшней Вселенной падение в такую черную дыру даже отдельных атомов газа из межзвездного пространства и ничтожных потоков света, пронизывающих Вселенную, гораздо больше, чем потери на излучение. Значит, черные дыры не только не уменьшаются в размерах, но растут. Чем больше черная дыра, тем меньше температура ее излучения. Поэтому квантовое излучение гигантских черных дыр и вовсе пренебрежимо.

Черные дыры взрываются!

Прочитав предыдущие абзацы, читатель может удивленно пожать плечами: «Столь мизерное явление! Почему же оно вызвало такую бурю удивления и восторгов среди физиков?»

Прежде всего потому, что до открытия С. Хоукинга физики были уверены — статическое поле тяготения вне черной дыры никак не может рождать частицы. Переменное же поле за горизонтом внутри дыры «невидимо», «неосязаемо» для внешнего наблюдателя, и о нем, казалось, можно забыть. Но квантовые

процессы как раз и характерны тем, что частица может оказаться там, где, с точки зрения классической физики, ее никак быть не должно. Например, частица может «просочиться» сквозь энергетический барьер, когда у нее не хватает энергии на его преодоление. С. Хоукинг показал, что такое свойство квантовых частиц в случае черных дыр ведет к качественно новому эффекту — квантовому испарению черных дыр. Предоставленные сами себе, без внешних воздействий, они медленно исчезают, превращаются в тепловое излучение, медленно затягиваются в пространстве и времени. Принципиальная важность открытия С. Хоукинга состоит именно в том, что опровергнуто представление о вечности черных дыр.

Но это еще не все. Чем меньше дыра, тем большей температуре соответствует ее излучение.

По мере уменьшения массы черной дыры в ходе испарения, ее температура нарастает, а значит, и процесс испарения ускоряется. Когда масса черной дыры уменьшится до тысячи тонн, температура ее излучения повысится до 1017 градусов! Процесс испарения превращается в фантастический взрыв. Эти последние тысячи тонн, сосредоточенные в микроскопическом размере, дыра излучает, а лучше сказать, взрывает за одну десятую долю секунды. Выделившаяся энергия эквивалентна взрыву одного миллиона мегатонных водородных бомб! В таком фантастическом фейерверке исчезает то, что раньше казалось вечной гравитационной бездной.

Конечно, произойти это может очень не скоро. Расчеты показывают, что если отсутствуют внешние воздействия, то черная дыра звездной массы испарится и взорвется в конце 10^{66}-летнего периода. Столь большой срок не могут представить себе даже астрономы.

Но, вероятно, эти процессы могут играть важную роль в далеком будущем Вселенной. Об этом мы поговорим в следующей части книги.

Вернемся от последних мгновений жизни черной дыры несколько назад, к ее нормальному состоянию и посмотрим, какие частицы при этом излучаются.

Черная дыра рождает не только фотоны, но и другие частицы. Сравнительно большие черные дыры с массой в несколько солнечных обладают столь низкой температурой, что могут производить только безмассовые частицы.

Эти частицы всегда летят со скоростью света и не имеют собственной массы покоя. К ним относятся фотоны, электронные и мюонные нейтрино, а также их античастицы и, наконец, еще не открытые гравитоны — кванты гравитационных волн. Черная

дыра с массой, типичной для звезд, рождает особенно много нейтрино (81 процент всего потока) всех сортов, затем фотонов (17 процентов) и гравитонов (2 процента). Тот факт, что разные частицы излучаются в разных количествах, объясняется различием их свойств. Нейтрино испускается больше всего потому, что их квантовое вращение (на языке квантовой физики — спин) минимально (1/2), а гравитонов меньше всего, так как их спин максимален (2).

Черные дыры малой массы имеют большую температуру. Так, температура черных дыр с массой меньше 10^{17}—10^{16} граммов, выше 10^{9}—10^{10} градусов. Эти черные дыры порождают, помимо перечисленных частиц, электронно-позитронные пары. Заметим, что размеры таких черных дыр составляют всего 10^{11} сантиметра - в 10^{10} раз меньше размеров атома.

Еще меньшие черные дыры с массой меньше $5*10^{14}$ граммов способны излучать также мюоны и более тяжелые элементарные частицы.

Размер этих черных дыр уже меньше атомного ядра. Конечно, такие карликовые черные дыры не могут возникать в ходе эволюции звезд. Но их появление было возможным в далеком прошлом. Если в начале расширения Вселенной, когда вещество было плотным, образовались такие «первичные» черные дыры с массой меньше 10^{15} граммов (теоретически это возможно, как показали Я. Зельдович и автор этой книги), то все они должны к нашему времени испариться. По этой причине процесс, открытый С. Хоукингом, имеет очень важное значение для космологии.

Скорее в плане мечтаний (хотя и строго научных) можно представить себе в отдаленном будущем искусственное изготовление в космосе малых черных дыр. Они могли бы аккумулировать энергию, затраченную на их изготовление, и затем излучать ее в заданном темпе и с заданной энергией частиц, которая определяется массой черных дыр. Так, черная дыра с массой 1015 граммов (масса небольшой горы) будет испускать 10^{17} эрг в секунду на протяжении 10 миллиардов лет.

Много еще неясного в новом явлении. Например, неизвестно, испаряется ли черная дыра совсем без остатка или на ее месте остается частичка с так называемой планковской массой. Неясно, можно ли наблюдать процесс испарения черных дыр во Вселенной. И конечно, пока только фантастическими представляются какие-либо эксперименты с черными дырами в лаборатории физиков. Однако уже то, что известно, заставляет по-новому осмыслить многие аспекты эволюции материи во Вселенной.

Мы заканчиваем рассказ о дырах в пространстве и времени. Меньше столетия назад люди не только понятия не имели о том, что это такое, но даже не смогли бы вообразить их себе, если бы какой-нибудь фантастический путешественник во времени прибыл к ним из нашей эпохи и попытался рассказать о подобных чудесах природы.

Надеемся, что наш рассказ хоть отчасти объяснял необычную популярность темы о черных дырах. Эту часть дилогии мы заканчиваем стихами поэта, выражающими ощущение человека, столкнувшегося с одной из величайших загадок природы, с тем огромным новым миром, который возникает после смерти звезд:

И звезды умирают во Вселенной...
Звезда уходит словно в глубь себя,

В последнем крике выплеснув все чувства...
Уходит внутрь, во тьму, в ничто;
Оставив бездну времени-пространства,
Воронку мрака среди звездной пыли.
Голодный; зев уже иных миров...
Что Дантов ад в сравненье с этим адом!
Безмолвной бездной, заключенной в сферу,
Где время перепуталось с пространством
И все пути ведут к уничтоженью
И только черный ветер во Вселенной.
Застывший ветер, смерч из звездной пыли
Стоит на страже на краю воронки...

М. Катыс

Часть II.
К границам бесконечности.

Глава I.
Вселенная после взрыва

Мир, в котором мы живем

Путешествуя в мир черных дыр, мы столкнулись с, казалось бы, невозможным — нарастающее поле тяготения буквально переворачивало свойства пространства и времени, открывая возможность удивительных физических процессов. Теперь мы отправляемся совсем к другим границам, отправляемся вдаль, в просторы Вселенной, где неожиданно вновь сталкиваемся с абсолютной властью тяготения. Более того, мы сталкиваемся здесь с потрясающим фактом — наблюдаемая Вселенная является следствием Большого взрыва, происшедшего около 15 миллиардов лет назад, причина которого — таинственная сингулярность, подобная той, что лежит в глубине черных дыр.

Стремление понять мир, в котором мы живем, конечно, было всегда, с тех пор как люди начали мыслить. История эволюции представлений о Вселенной интересна и поучительна. Но знакомство с историей не является нашей целью. Об этом написано много прекрасных книг.

Обратимся сразу к нашему времени, к нашим знаниям. Если мы и станем иногда обращаться к истории, то только к новейшей,

а в более отдаленное прошлое науки о всей Вселенной, называемой космологией, будем заглядывать не часто.

Когда мы пытаемся понять, что представляет собой Вселенная, первое, с чем мы сталкиваемся, это распределение небесных тел в пространстве. Нас будут интересовать в первую очередь самые крупные масштабы, доступные астрономам, и мы начнем с крупнейших структурных единиц Вселенной — с галактик.

Напомним читателю, что наше Солнце входит в состав огромной звездной системы, которую астрономы называют Галактикой с большой буквы, или иногда еще — нашей Галактикой. Общее число звезд, составляющих Галактику, около ста миллиардов.

Подавляющая часть звезд Галактики заполняет объем, напоминающий линзу, поперечником в 100 тысяч световых лет и толщиной 12 тысяч световых лет. Вспомним, что световой год — это расстояние, проходимое светом за год, равное 10^{13} километрам. В межзвездном пространстве находятся разреженный газ и пыль, собранные в большие облака. Общая их масса составляет только 5 процентов от общей массы звезд. Помимо этого «основного тела» Галактики, в ней имеется еще одна составляющая сферической формы радиусом около 5—10 тысяч световых лет. В эту сферическую систему входят звезды, как правило, менее яркие и более старые, чем в сплюснутой системе.

Молодые горячие звезды сплюснутой системы, которую иногда называют диском, собраны в спиральные рукава. Эти рукава начинаются у центральных областей Галактики и раскручивающейся спиралью простираются к ее окраинам.

По имени спиральных рукавов всю нашу Галактику называют спиральной. В спиральных рукавах имеются мощные скопления газа — газовые облака, где происходит образование молодых звезд.

Звезды и газ диска совершают орбитальные движения вокруг центра масс Галактики по почти круговым орбитам. Наше Солнце движется в Галактике со скоростью около 250 километров в секунду и совершает один оборот за 200 миллионов лет. Звезды сферической составляющей тоже движутся вокруг центра, но по очень вытянутым орбитам, произвольно наклоненным к плоскости диска.

Таковы структура и масштабы большого звездного города, как иногда называют нашу звездную систему.

За пределами нашей Галактики находятся другие звездные города — галактики с маленькой буквы. Большинство

наблюдаемых галактик имеет размеры, лишь немногим уступающие нашей: в десятки тысяч световых лет, и состоят они из миллиардов звезд.

Все эти звездные системы находятся от нас на расстояниях, превышающих миллионы световых лет. Только ближайшие и крупнейшие из них видны на небе невооруженным глазом в виде туманных пятен, остальные доступны лишь большим телескопам. Из-за огромных расстояний свечение звезд в них сливается в туманное сияние. Лишь в ближайших галактиках с помощью крупнейших телескопов видны яркие звезды по отдельности.

Галактики различаются по своим формам, составу звезд, в них входящих, и по характеру их движений. По этим признакам астрономы делят галактики на четыре основных типа.

Большая часть галактик — это спиральные, подобные нашей. Но имеются галактики, в которых в линзовидном диске нет спиралей. Их так и называют — линзообразные.

Наконец, немало галактик, которые вообще не имеют диска и состоят целиком из сферической составляющей. Их называют эллиптическими за то, что на фотографиях и в телескоп они выглядят эллиптическими овалами. В этих звездных системах, как правило, мало газа и практически нет областей рождения молодых звезд.

Наименее многочислен тип неправильных галактик. Они похожи на спиральные, только яркие облака скоплений молодых звезд в них не вытянуты в спирали, а разбросаны в виде пятен. Часто эти галактики содержат большое количество газа.

Уже это беглое знакомство показывает, насколько разнообразен мир галактик. Это разнообразие выступает еще разительнее, когда мы сравниваем массы галактик и их размеры.

Напомним, что наша Галактика состоит из 100 миллиардов звезд. Крупнейшие галактики, относящиеся к классу эллиптических, содержат до десяти тысяч миллиардов звезд. В то же время есть «карликовые» галактики, состоящие всего из миллиона звезд.

Какую галактику можно считать типичной? Такую сравнительно большую, как наша, или заметно меньше?

Ответить на этот вопрос столь же трудно, как и на вопрос: какой город считать типичным — такой большой, как Москва, или заметно меньший? Ведь на один большой город приходится десятки маленьких. Точно такая же картина в мире галактик. На каждую гигантскую систему приходится большое количество карликов.

Как же распределены галактики в пространстве?

Оказалось, что это распределение крайне неравномерное.

Большая часть их входит в состав скоплений. Скопления галактик столь же разнообразны по своим свойствам, как и сами галактики. Чтобы навести в их описании хоть какой-нибудь порядок, астрономы придумали несколько их классификаций. Как всегда в подобных случаях, ни одна классификация не может считаться полной. Для наших целей достаточно сказать, что скопления можно разделить на два типа — правильные и неправильные.

Правильные скопления часто огромны по своей массе. Они обладают сферической формой и в них входят десятки тысяч галактик. Как правило, все эти галактики эллиптические или линзообразные. В центре находятся одна или две гигантские эллиптические галактики. Ближайшее к нам правильное скопление находится в направлении созвездия Волосы Вероники на расстоянии около трехсот миллионов световых лет и имеет в поперечнике более десяти миллионов световых лет. Галактики в этом скоплении движутся друг относительно друга со скоростями около тысячи километров в секунду.

Гораздо более скромны по массам неправильные скопления. Число галактик, в них входящих, в десятки раз меньше, чем в правильных скоплениях, и это галактики всех типов. Форма их неправильная, имеются отдельные сгущения галактик внутри скопления.

Неправильные скопления могут быть и совсем маленькими, вплоть до мелких групп, состоящих из нескольких галактик.

Что же дальше, в еще более крупных масштабах, чем скопления галактик? Есть ли скопления скоплений галактик, то есть сверхскопления?

В последнее время исследованиями эстонских астрофизиков Я. Эйнасто, А. Саара, М. Йыэвээра и других, американских специалистов П. Пиблса, О. Грегори, Л. Томпсона показано, что самые крупномасштабные неоднородности в распределении галактик носят «ячеистый» характер. В «стенках ячеек» много галактик, их скоплений, а внутри — пустота. Размеры ячеек около 300 миллионов световых лет, толщина стенок 10 миллионов световых лет. Большие скопления галактик находятся в узлах этой ячеистой структуры. Отдельные фрагменты ячеистой структуры и называют сверхскоплениями. Сверхскопления часто имеют сильно вытянутую форму наподобие нитей или лапши. А еще дальше?

Вот тут мы сталкиваемся с новым обстоятельством. До сих пор мы встречались со все более сложными системами: маленькие системы образовывали большую систему, эти большие системы, в свою очередь, объединялись в еще большую и так

далее. То есть Вселенная напоминала русскую матрешку. Маленькая матрешка находится внутри большой, та внутри еще большей. Оказалось, что во Вселенной есть наибольшая матрешка! Крупномасштабная структура в виде «лапши» и «ячеек» не собирается уже в более крупные системы, а равномерно в среднем заполняет пространство Вселенной. Вселенная в самых больших масштабах (более трехсот миллионов световых лет) оказывается одинакова по своим свойствам — однородна. Это очень важное свойство и одна из загадок Вселенной. Почему-то в сравнительно мелких масштабах есть огромные сгустки вещества — небесные тела, их системы, все более сложные, вплоть до сверхскоплений галактик, а в очень больших масштабах структурность исчезает. Подобно песку на пляже. Глядя вблизи, мы видим отдельные песчинки, глядя с большого расстояния и охватывая взглядом значительную площадь, видим однородную массу песка.

То, что Вселенная однородна, удалось проследить вплоть до расстояний в десять миллиардов световых лет!

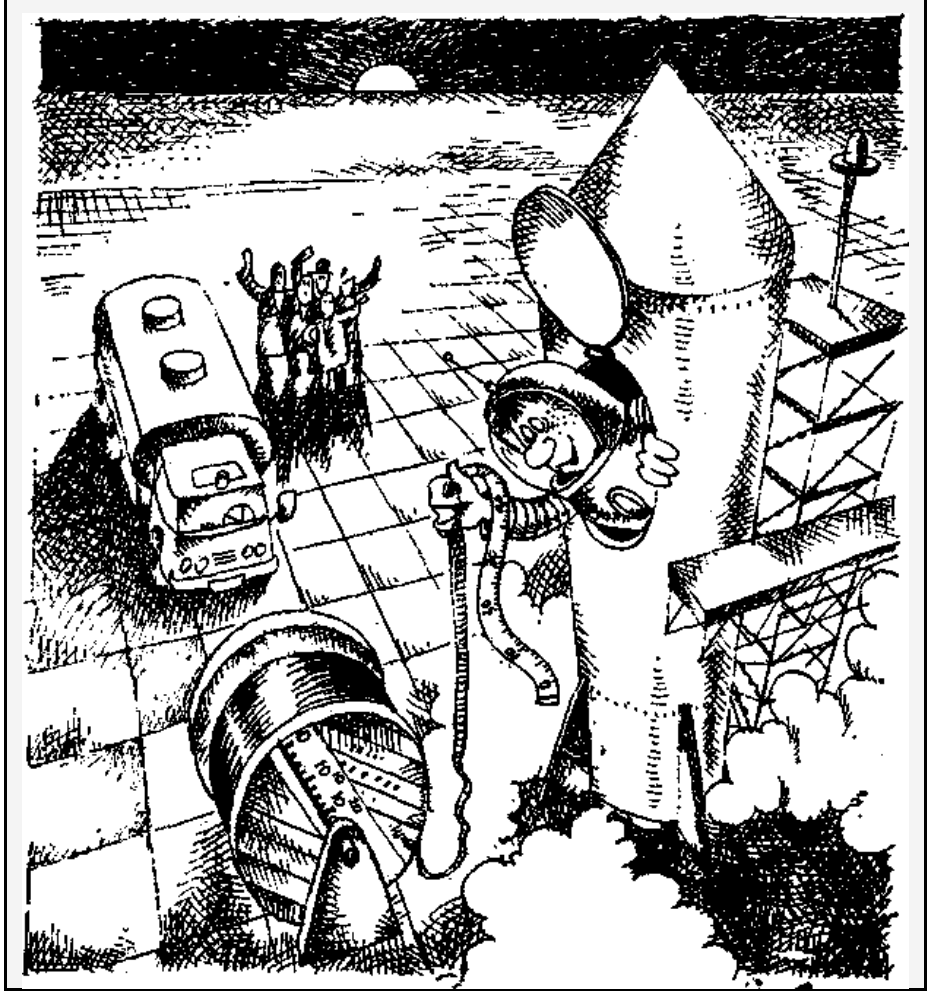
К решению загадки однородности мы еще вернемся, а пока обратимся к вопросу, который, наверно, возник у читателя. Как удается измерить столь огромные расстояния до галактик и их систем, уверенно говорить об их массах, о скоростях движения галактик?

«Мерные масштабы» и другие инструменты астрономов

Начнем с расстояний. Несомненно, измерение расстояний в миллионы световых лет и более является чудом современной науки.

Еще в начале нашего века об измерении подобных расстояний не было и речи. Как же, с какими «мерными лентами» удалось пробиться сквозь эти невообразимые дали?

Это был очень трудный научный путь. Шаг за шагом, ступенька за ступенькой удавалось постепенно продвигаться в измерении все более далеких расстояний. При этом следующий шаг всегда основывался на успехах предыдущего.



Первая серьезная ступенька была преодолена еще в середине прошлого века. Расстояния до трех близких к нам звезд были измерены практически одновременно в России, Германии и Африке. Суть метода этих измерений в принципе такая же, как и в измерении расстояний на Земле с помощью дальномера. Дальномеры теперь встроены даже в фотоаппараты и поэтому знакомы каждому. Принцип работы такого прибора состоит в том, что направление на рассматриваемый предмет несколько различно для разных окошечек дальномера. Если известно расстояние между окошечками и угол изменения направления, то легко рассчитывается расстояние по правилам тригонометрии. В дальномере этот расчет выполняет простейшее механическое устройство. Чем дальше предмет, тем на большее расстояние надо разнести окошечки дальномера, чтобы измерение было

достаточно надежным. Расстояние между окошечками называют базисом, а сам способ получил название тригонометрического. При измерении расстояний до звезд роль базиса играет диаметр земной орбиты вокруг Солнца. Изменение направления на звезду измеряется с интервалом в полгода из диаметрально противоположных точек земной орбиты. Но даже при таком огромном базисе изменение направления на ближайшие звезды меньше одной угловой секунды дуги, и требуется большая тщательность и высокое искусство измерений.

Выяснилось, что даже ближайшие звезды удалены от нас на расстояние больше светового года.

Со времени первых измерений расстояний до звезд прошло больше столетия. Несмотря на огромный прогресс в технике и методах измерений, и сейчас с помощью тригонометрического метода можно уверенно определять расстояние до звезд не больше ста световых лет.

До границ Галактики при этом еще невообразимо далеко, а о других галактиках и говорить не приходится.

Следующий огромный шаг по лестнице, ведущей вдаль, был сделан уже в начале нашего столетия, и его помогли сделать звезды, систематически меняющие свой блеск, — переменные звезды.

Начало было положено американским астрономом Генриеттой Ливитт, изучавшей переменные звезды в одной из ближайших к нам галактик — Малом Магеллановом Облаке, видимом на южном небесном полушарии.

Через несколько лет после начала исследования она выяснила любопытнейший факт. Двадцать пять звезд оказались переменными, строго периодически меняющими свой блеск. Причем чем больше был период изменения блеска, тем арче была сама звезда! Г. Ливитт пришла к замечательному выводу: «Так как эти переменные звезды, вероятно, находятся на одинаковом расстоянии от Земли (потому что все они находятся в одной галактике — Малом Магеллановом Облаке, — И. Н.), их периоды, очевидно, связаны с количеством излучаемого ими света».

Значение этого открытия трудно переоценить. По периоду изменения яркости можно узнать светимость звезды.

Мы знаем, что видимый блеск звезды на небе ослабевает обратно пропорционально квадрату расстояния до нее. Сравнивая истинную светимость звезды с видимым блеском, можно вычислить расстояние!

Правда, для того, чтобы можно было по периоду изменения блеска звезд, изученных Г. Ливитт, вычислять расстояние, надо знать истинную светимость хотя бы одной такой звезды.

Первая попытка это сделать была предпринята Э. Герцшпрунгом. Он понял, что звезды, наблюдаемые Г. Ливитт в Малом Магеллановом Облаке, точно такие же, как хорошо известные переменные звезды, называемые цефеидами, в нашей Галактике. Блеск цефеид меняется из-за того, что они пульсируют. Теперь надо было определить истинную светимость хотя бы одной цефеиды. Вот тут-то и начались серьезные трудности. В окрестности Солнца нет ни одной цефеиды, расстояние до которой надежно можно было бы определить тригонометрическим способом и, зная ее видимый блеск и расстояние, вычислить истинную светимость.

Начались многочисленные попытки определения расстояний до цефеид нашей Галактики. Первая оценка была сделана самим Э. Герцшпрунгом. Мы не будем описывать здесь суть используемых при этом хитрых косвенных методов. Отметим только, что и первая, и многие последующие попытки были столь трудны, что привели к результатам, содержащим значительные ошибки. Эти ошибки были окончательно выявлены только в начале 60-х годов. Но работа эта настолько важна (речь идет об измерении масштабов Вселенной!), что уточнения продолжаются до сих пор.

После того как установлена истинная светимость хоть одной цефеиды с известным периодом изменения блеска, стало возможным измерять расстояние до любой цефеиды. Действительно, теперь известна зависимость «период — истинная светимость» для цефеид. Для определения расстояния до любой цефеиды достаточно по наблюдениям определить период изменения ее блеска, затем по зависимости найти истинную светимость и, сравнивая с видимым блеском, вычислить расстояние. Если цефеида входит в состав какого-либо скопления звезд или галактики, то тем самым определяется расстояние и до них.

Цефеиды здесь используются как «стандартные свечи», истинная яркость которых известна. Поэтому и весь метод получил название метода «стандартной свечи».

Роль цефеид в измерении расстояний столь велика, что известный американский астроном Х. Шепли назвал их «самыми важными» звездами.

Истинная светимость цефеид очень велика — они в тысячу раз ярче Солнца. Поэтому цефеиды видны с достаточно больших расстояний, вплоть до 15 миллионов световых лет. Значит, с их помощью можно определять расстояние до ближайших галактик.

Но нас интересуют еще большие масштабы!

Для дальнейшего продвижения приходится делать еще один

шаг. Хотелось бы найти «стандартные свечи» более яркие, чем цефеиды, и хорошо видимые с еще больших расстояний. Оказалось, что такие «свечи» есть. Вокруг галактик обычно наблюдается много звездных скоплений, которые за свою форму получили название шаровых.

Когда с помощью цефеид были определены расстояния до ближайших галактик, сравнили истинные светимости шаровых скоплений вокруг разных галактик. Оказалось, что если выбрать вокруг каждой галактики ярчайшее шаровое скопление, то истинная светимость этих ярчайших скоплений практически одинакова для всех галактик.

Значит ярчайшие шаровые скопления вокруг галактик можно использовать как «стандартную свечу», причем более яркую, чем цефеиды.

Этим методом можно измерять расстояние вплоть до шестидесяти миллионов световых лет. А это значит, что можно измерить расстояние уже до ближайших скоплений галактик. Дальше, увы, шаровые скопления различать пока невозможно.

Следующая ступень — использование еще более яркой «стандартной свечи». Выяснилось, что в разных скоплениях галактик ярчайшие галактики имеют одинаковую светимость — примерно в десять раз больше светимости нашей Галактики.

Эти ярчайшие «стандартные свечи» позволяют продвигаться уже на миллиарды световых лет.

Такова «лестница масштабов», используемая астрономами на пути в глубь Вселенной.

А как измеряют скорости движения далеких объектов?

Разумеется, на расстояниях не только ближайших к нам галактик, но и более отдаленных не заметны никакие перемещения звезд и других объектов на фоне неба, по которым можно было бы вычислить скорость перемещения их в пространстве поперек луча зрения.

Единственное, что можно измерить, но зато сравнительно просто и надежно, это скорость приближения к нам или удаления небесных тел. Такое измерение делается методом, использующим эффект Доплера, о котором уже упоминалось в первом разделе книги. Когда небесное тело приближается к нам — свет его голубеет, когда удаляется — краснеет. Измерение смещения линий в спектре звезды к голубому или красному концу позволяет вычислить скорость, точнее, ту часть скорости, которая направлена по «лучу зрения». Поэтому скорости, определенные по эффекту Доплера, астрономы называют «лучевыми скоростями».

Наконец, об измерении массы галактик и скоплений галактик. Ее можно определить, используя закон всемирного

тяготения.

Пусть мы наблюдаем, скажем, эллиптическую галактику. В ней звезды движутся с определенными скоростями друг относительно друга. Если бы не было сил тяготения, они бы разлетелись в пространстве. Силы тяготения, обусловленные общей массой всей галактики, удерживают их от разбегания. Измерив относительные скорости звезд в галактике (это можно сделать методом Доплера) и зная размер галактики, можно вычислить силы тяготения, а значит, и массу, их создающую. Так определяют массы галактик.

При измерении масс скоплений галактик поступают аналогичным образом, только вместо движений отдельных звезд используют движение галактик в скоплении.

Теперь мы знакомы в общих чертах с тем, как были получены числа, описывающие устройство Вселенной в больших масштабах.

Возникает еще один вопрос. Как движутся в пространстве скопления галактик и отдельные, достаточно удаленные галактики?

Ответ на этот вопрос явился величайшим открытием естествознания XX века. Оказалось, что мы живем в расширяющейся Вселенной. Скопления галактик удаляются друг от друга, все вещество Вселенной было приведено в состояние расширения таинственным Большим взрывом в далеком прошлом.

Вселенная должна эволюционировать

То, что Вселенная, в которой мы живем, должна либо расширяться, либо сжиматься, было предсказано теоретически замечательным советским ученым А. Фридманом в 1922—1924 годах. Работы А. Фридмана были строго математичны и основывались на теории тяготения Эйнштейна. Но для того чтобы понять суть его открытия, нет надобности обращаться к строгой математике. Как все великое, это открытие в основе своей очень просто.

Вспомним, почему не сжимается и не расширяется обычная звезда. В ней силы тяготения уравновешены силой, создающейся перепадом давлений от плотных недр звезды к рыхлой поверхности. Но Вселенная однородна в самых больших масштабах, никакого перепада давлений в ней быть не может. Значит, там единственной существенной силой остается тяготение.

Поэтому, если представить себе, что в какой-то момент огромные массы Вселенной в среднем неподвижны друг

относительно друга и распределены однородно, то в следующий момент под действием тяготения они придут в движение, вещество начнет сжиматься. В сравнительно маленьких системах тяготение можно уравновесить круговым движением тел по орбитам (как в Солнечной системе) или хаотическим движением тел по очень вытянутым орбитам (как в эллиптических галактиках). Но в огромной Вселенной это невозможно — пришлось бы задавать скорости, больше скорости света, что запрещено законами природы.

Стационарность для Вселенной невозможна — таков был вывод А. Фридмана. Но Вселенная не обязательно должна именно сжиматься под действием тяготения. Если вначале задать всем массам скорости удаления друг от друга, то она будет расширяться, а тяготение будет только тормозить разлет. Таким образом, будет ли разлет или сжатие — зависит от начальных условий, от физики процессов, которые определили начальные скорости масс. Так была теоретически открыта необходимость глобальной эволюции Вселенной.

Эта идея была совершенно новой, крайне необычной. Разные схемы строения Вселенной господствовали в науке, сменяя друг друга на протяжении веков. Но все (или почти все) эти схемы объединяло одно — это были именно схемы строения — не развития, эволюции, становления, а вечно неизменный «механизм часов Вселенной». Идея стационарности всей Вселенной казалась само собой разумеющейся. Во Вселенной могли происходить сложнейшие процессы, но от чего, от какого состояния и куда должна развиваться вся Вселенная?

Мысль об эволюции всей Вселенной представлялась нелепой, и эта мысль с большим трудом овладевала сознанием даже крупных ученых. В качестве примера можно привести самого А. Эйнштейна. Творец теории относительности понимал, сколь важна его теория для космологии. Сразу после создания общей теории относительности он стал выяснять, имеются ли у уравнений теории, примененных ко всей Вселенной, статические решения, то есть решения, описывающие состояние, не меняющееся со временем. А. Эйнштейну казалось очевидным, что надо строить именно статическую, а не эволюционирующую модель Вселенной. Но уравнения общей теории относительности в применении ко Вселенной не давали статических решений. Идея статического мира казалась настолько привлекательной, что А. Эйнштейн не поверил своим уравнениям и пытался даже их изменить, чтобы они давали стационарное решение. Мы дальше поговорим еще об этой его попытке.

Почему же идея статичности Вселенной была столь

привлекательна?

По-видимому, это происходило потому, что она основывалась на видимой стационарности, неизменности астрономических тел и систем, будь то Солнечная система, звезды, звездные скопления или галактики. Вольно или невольно наблюдаемое постоянство астрономических явлений во всех известных человечеству масштабах распространялось на всю Вселенную. Очень четко об этом сказано еще у Аристотеля в его сочинении «О небе»: «В продолжение всего прошедшего времени, согласно летописям, завещаемым потомкам от поколения к поколению, мы не находим следа изменений ни во всем удаленном небе в целом, ни в одной из подходящих частей неба».

Сегодня, в конце XX века, мысль о том, что вся Вселенная должна эволюционировать, кажется нам естественной. Мы теперь знаем, что неизменность звезд, других небесных тел и их систем только кажущаяся. Человек их наблюдает в течение сроков слишком коротких, чтобы заметить эволюцию, изменение. Но звезды рождаются, живут и умирают. Продолжительность их жизни часто составляет миллиарды лет. Источником энергии, излучаемой звездами, являются ядерные реакции, идущие в их недрах. Любой источник энергии не вечен. Конечны запасы ее и в случае ядерных источников. Значит, и Солнце и звезды возникли в конечном прошлом и имеют свою историю.

Мы наблюдаем сегодня бурные процессы взрывов и эволюции в таких гигантских системах, какими являются галактики. Вещество, входящее в галактики, постепенно перерабатывается в ядерных процессах, идущих в звездах. Водород превращается в гелий, а затем и в более тяжелые химические элементы.

Итак, статическая картина неприемлема ни для каких астрономических систем, если только рассматривать достаточно большие промежутки времени. Если бы сегодня надо было заново строить модель Вселенной, необходимо было бы потребовать, чтобы модель была эволюционирующей, чтобы в ней было указание на эпоху, когда во Вселенной началось рождение звезд, галактик и т. д.

Но вернемся к началу нашего века. Первая работа А. Фридмана, доказывающая, что Вселенная должна эволюционировать, была получена редакцией немецкого «Физического журнала» в конце июня 1922 года. А. Эйнштейн был настолько убежден в необходимости статического решения уравнений, описывающих состояние Вселенной, что посчитал работу А. Фридмана ошибочной. В середине сентября 1922 года редакция того же журнала получила краткую заметку А. Эйнштейна. В ней он, по выражению академика В. Фока,

«несколько свысока говорит, что результаты Фридмана показались ему подозрительными и что он нашел в них ошибку, по исправлении которой решение Фридмана приводится к стационарному».

А. Фридман узнал о мнении А. Эйнштейна из письма своего коллеги по работе в Петрограде Ю. Пруткова, бывшего в то время в командировке за границей. В декабре 1922 года А. Фридман написал А. Эйнштейну письмо, в котором подробно излагал суть своих вычислений, убедительно доказывая свою правоту. Письмо заканчивалось словами:

«В случае, если Вы сочтете правильными изложенные в моем письме расчеты, я прошу Вас не отказать мне в том, чтобы известить об этом редакцию «Физического журнала»; быть может, в этом случае Вы поместите в печати поправку к вашему высказыванию или предоставите возможность для перепечатки отрывка из этого моего письма».

Письмо было получено А. Эйнштейном и сохранилось в его архивах, но, по-видимому, он не прочел его во время или не обратил внимание, будучи уверен в своей правоте.

В мае 1923 года Ю. Прутков встретился с А. Эйнштейном в Лейдене в доме известного голландского физика П. Эренфеста и в неоднократных беседах доказал правоту выводов советского математика. В письме к сестре в Петроград от 18 мая 1923 года Ю. Прутков пишет: «Победил Эйнштейна в споре о Фридмане. Честь Петрограда спасена!»

Сразу после бесед с Ю. Прутковым А. Эйнштейн направил в «Физический журнал» заметку, которую мы приведем здесь полностью:

> «К работе А. Фридмана «О кривизне пространства».
>
> В предыдущей заметке я подверг критике названную выше работу. Однако моя критика, как я убедился из письма Фридмана, сообщенного мне г-ном Прутковым, основывалась на ошибке в вычислениях. Я считаю результаты Фридмана правильными и проливающими новый свет. Оказывается, что уравнения поля допускают наряду со статическим также и динамические (т. е. переменные относительно времени) центрально симметричные решения для структуры пространства».

А. Эйнштейн в дальнейшем всегда подчеркивал важность работ А. Фридмана в создании современной космологии. В 1931 году он писал: «Первым... на этот путь вступил Фридман».

Открытие расширения вселенной

Далекие звездные системы - галактики и их скопления — являются наибольшими известными астрономам структурными единицами Вселенной. Они наблюдаются с огромных расстояний и именно изучение их движений послужило наблюдательной основой исследования кинематики Вселенной.

Пионером измерения лучевых скоростей у галактик был в начале нашего века американский астрофизик В. Слайфер: В то время еще не были известны расстояния до галактик и велись ожесточенные споры, находятся ли они внутри нашей звездной системы — Галактики — или далеко за ее пределами. В. Слайфер обнаружил, что большинство галактик (36 из измеренных им 41) удаляется и скорость удаления доходит почти до двух тысяч километров в секунду. Приближались к нам только несколько галактик. Как выяснилось позже, Солнце движется вокруг центра нашей Галактики со скоростью около 250 километров в секунду и большая часть «скоростей приближения» этих нескольких ближайших галактик связаны именно с тем, что Солнце сейчас движется к этим объектам.

Итак, галактики согласно В. Слайферу удалялись от нас. Линии в их спектрах были смещены к красному концу. Это явление получило название «красного смещения».

В 20-е годы были измерены расстояния до галактик. В 1923 году американский астроном Э. Хаббл открыл первую цефеиду в одной из ближайших к нам галактик в созвездии Андромеды. Через год им было открыто уже более десяти цефеид в этой галактике и двадцать две цефеиды еще в одной галактике в созвездии Треугольника.

Цефеиды были открыты и в других галактиках. Расстояния до этих цефеид, а значит, и до галактик, в которых они находятся, оказались гораздо большими, чем размер нашей собственной Галактики. Тем самым было окончательно установлено, что галактики — это далекие звездные системы, подобные нашей.

Для установления расстояний до галактик, помимо цефеид, уже в первых работах использовались и другие методы. Так, одним из таких методов является использование ярчайших звезд в галактике как индикатора расстояний. Ярчайшие звезды, по-видимому, имеют одинаковую светимость и в нашей Галактике, и в других галактиках, и по этой «стандартной свече» можно определять расстояние. Но ярчайшие звезды имеют большую светимость, чем цефеиды, могут быть видны с больших расстояний и являются, таким образом, более мощным индикатором расстояний.

Сравнение расстояний до галактик со скоростями их удаления (скорости были определены еще В. Слайфером и другими астрономами и только исправлялись за счет учета движения Солнца в Галактике) позволило Э. Хабблу установить в 1929 году замечательную закономерность: чем дальше галактика, тем больше скорость ее удаления от нас. Оказалось, что существует простая зависимость между скоростью удаления галактики и расстоянием до нее: скорость прямо пропорциональна расстоянию. Коэффициент пропорциональности называют теперь постоянной Хаббла.

Согласно измерениям Э. Хаббла галактики, находящиеся от нас на расстоянии одного миллиона световых лет, удаляются со скоростями сто семьдесят километров в секунду.

Со времени открытия Э. Хаббла прошло более 50 лет. Неизмеримо возросла мощность астрономических исследований, и эти исследования подтвердили закон Хаббла — закон пропорциональности скорости удаления галактик их расстоянию. Однако оказалось, что величина коэффициента пропорциональности была Э. Хабблом сильно завышена.

Дело было в том, что расстояния до галактик были определены им с ошибкой. Они были занижены раз в шесть-десять. Удивляться этому не приходится, ибо, как мы видели, для определения больших расстояний надо пройти по ступенькам длинной лестницы и ошибки возможны на каждой ступеньке.

Главные источники ошибок были установлены лишь после 1950 года, когда начал работать крупнейший в то время 5-метровый телескоп обсерватории Маунт Паломар. В 1952 году американский астрофизик В. Бааде обнаружил, что цефеиды того типа, который использовал Э. Хаббл, в действительности примерно в четыре раза ярче, чем думали раньше. Это означало, что расстояния до ближайших галактик, определенное по цефеидам, в действительности примерно вдвое больше. После добавочных уточнений оказалось, что расстояния до ближайших галактик надо утроить. Ошибка на этой ступеньке лестницы повлекла за собой ошибки и на последующих. Все измеренные расстояния и до более далеких галактик также пришлось утроить.

До описанного изменения шкалы расстояний казалось, что все соседние галактики заметно меньше нашей. Это выглядело странным. После пересмотра шкалы стало ясно, что многие галактики по размерам такие же, как наша, и даже больше. Такой вывод подкреплял уверенность в правильности пересмотра шкалы расстояний.

В конце 50-х годов выяснилось, что есть существенные ошибки и в последующих ступеньках лестницы, ведущей в даль

Вселенной. Расстояния до более далеких галактик, где цефеиды уже не видны, тоже были определены Хабблом с ошибкой. Причин было две. Первая связана с тем, что для определения видимого блеска очень слабых звезд в других галактиках надо проводить сравнения их блеска с известными стандартами. Это очень сложная задача, и оказалось, что в стандартной процедуре измерений имеются погрешности.

Вторая причина неточностей состояла в том, что Э. Хаббл ошибочно принял за ярчайшие звезды в далеких галактиках (эти звезды использовались им как «стандартные свечи») очень яркие газовые облака ионизованного водорода. С таких больших расстояний эти облака выглядели яркими точками, подобно звездам, что и привело к ошибке. В результате шкала расстояний до далеких галактик была увеличена еще примерно в 2,2 раза.

Если мы учтем все сказанное, то окажется что все расстояния до самых далеких галактик больше, чем думал Э. Хаббл, примерно в шесть-десять раз. Точнее сказать пока невозможно. Во столько же раз оказалась меньше постоянная Хаббла, чем считал сам Э. Хаббл. Согласно современным данным галактики на расстоянии одного миллиона световых лет от нас удаляются со скоростями около 25 километров в секунду.

После этих уточнений вернемся к принципиальному значению открытия Э. Хаббла для нашего понимания строения Вселенной.

Это открытие показывало, что галактики удаляются от нас во все стороны и скорость этого удаления прямо пропорциональна расстоянию.

Этот факт вызывает невольно удивление: почему именно от нас, от Галактики, происходит разбегание других галактик. Неужели мы находимся в центре Вселенной?

Такой вывод неправилен. Дело в том, что галактики удаляются не только от нашей Галактики, но и друг от друга. Если бы мы находились в другой галактике, то видели бы точно такую же картину разбегания, как и из нашей звездной системы.

Чтобы понять это, представим себе две галактики, удаляющиеся от нас в одном направлении, причем вторая галактика находится от нас вдвое дальше, чем первая и удаляется с вдвое большей скоростью. Перенесемся мысленно на эту вторую галактику. Она удаляется от нашей, и наблюдателю на ней, который, естественно, считает себя неподвижным, кажется, что наша Галактика движется в противоположном направлении с той же скоростью. Первая же галактика, находящаяся на полпути между нашей и второй галактикой, отстает от нее, а наблюдателю на второй галактике кажется, что она удаляется от нее в ту же

сторону, что и наша, но с меньшей скоростью. Сказанное можно повторить для любых галактик.

Значит, с точки зрения наблюдателя в любой галактике картина выглядит так, как будто галактики разбегаются именно от него.

Можно представить себе еще одну модель для пояснения сказанного. Возьмем однородный шар и затем увеличим его размеры, скажем, вдвое, так, чтобы шар оставался по-прежнему однородным. Ясно, что при этом расстояния между любыми парами точек внутри шара тоже увеличатся вдвое, как бы мы эти точки ни выбирали внутри шара. Значит, при раздувании шара, где бы наблюдатель ни находился внутри его, он будет видеть одинаковую картину удаления от него всех точек внутри шара. Если взять шар неограниченно большого размера, то мы и получим картину, описанную выше, не зависящую от положения наблюдателя.

Итак, фундаментальный факт заключается в том, что галактики разбегаются — Вселенная расширяется. Это является блестящим подтверждением вывода теории Фридмана о нестационарности Вселенной.

Иногда задают следующий вопрос. Пусть скопления галактик в среднем равномерно заполняют всю Вселенную, тогда спрашивается: «куда», «во что» расширяется Вселенная?

Этот вопрос неправилен сам по себе. Вселенная — это все, что существует. Вне Вселенной ничего нет. Причем нет не только галактик или какой-либо другой материи, но и вообще ничего — ни пространства, ни времени. Нет той пустоты, в которую можно расширяться. Но для расширения Вселенной и не требуется ничего вне ее. Поясним это наглядным примером.

Пусть имеется бесконечная плоскость, на которую нанесены равномерно точки — галактики. Растянем теперь эту плоскость во всех направлениях равномерно так, чтобы расстояния между точками увеличились. Спрашивается, куда же растягивалась плоскость? Ведь она и так простиралась до бесконечности. Очевидно, таковы свойства бесконечности. Увеличив бесконечность вдвое, будем иметь все ту же бесконечность!

***

Давайте ненадолго отвлечемся от галактик и Вселенной и поговорим немного о бесконечности, ибо это понятие играет важнейшую роль в наших представлениях о Вселенной.

Бесконечность изучается математикой, тем ее разделом, который называется теорией множеств. Большинство из тех, кто не занимался этим вопросом специально, имеет о бесконечности весьма смутное (и наивное) представление. Интуитивно кажется,

что бесконечность — это то, что получается, если неограниченно продолжать счет 1, 2, 3,. и т. д. без конца. Казалось бы, какая тут еще может быть теория бесконечного?

В действительности свойства бесконечного вовсе не исчерпываются неограниченным продолжением счета. Более того, эти свойства бесконечно разнообразнее и удивительнее любых свойств конечных чисел и их совокупностей.

Мы познакомимся с некоторыми из них. Начнем с рассказа, приписываемого знаменитому математику Д. Гильберту.

Представим себе гостиницу с бесконечным числом номеров, «перенумерованных» по порядку:

1, 2, 3...

Все номера заняты. Поздно вечером приезжает еще один гость. «Свободных мест нет», — говорит ему портье. «Это не играет роли, — вступает в разговор управляющий. — Переселим гостя из номера 1 в номер 2, гостя из номера 2 — в номер 3, гостя из номера 3 — в номер 4 и так далее, а вновь прибывшего гостя поместим в освободившийся номер 1».

Среди ночи приезжает еще 1000 гостей. «Свободных мест нет», — говорит им портье. «Неважно, — возражает управляющий. Переселим гостя из номера 1 в номер 1001, гостя из номера 2 — в номер 1002 и так далее, а вновь прибывших гостей поместим в освободившиеся номера от 1 до 1000».

Не успели все гости разойтись по отведенным им номерам, как в гостиницу вваливается толпа. На этот раз вновь прибывших бесконечно много, и мы обозначим их А1, А2, А3... «Свободных мест нет», — говорит портье. «Ничего страшного, — все так же спокоен управляющий. — Переселим гостя из номера 1 в номер 2, гостя из номера 2 — в номер 4, гостя из номера 3 — в номер 6 и вообще каждого гостя из последующего номера - попросим переехать в номер с вдвое большим числом. Тогда гостей А1, А2, А3... мы сможем поселить в номерах 1, 3, 5,...».

В этой истории наглядно показано, что в бесконечности часть может быть равна целому. Действительно, запишем бесконечное число четных номеров в виде бесконечного ряда, а под этим рядом напишем номера гостей 1,2,3...

2, 4, 6, 8, ...

1, 2, 3, 4, ...

Каждому четному числу соответствует один номер гостя и наоборот. Значит, число четных чисел равно числу всех чисел натурального ряда. На первый взгляд это противоречит нашей интуиции. Ведь четные числа составляют лишь половину всех чисел. Это действительно так для любой конечной совокупности чисел. Но когда мы переходим к бесконечности, все меняется и

часть может равняться целому, в чем мы наглядно убедились, сравнивая написанные выше два ряда.

О подобных же свойствах говорят и другие примеры, приведенные в шутливой истории Д. Гильберта.

Из приведенных выше примеров может показаться, что все бесконечности, так сказать, одинаковы, то есть что любое бесконечное множество элементов можно пересчитать с помощью бесконечного ряда натуральных чисел, как мы это сделали с четными числами.

Но это не так!

Знаменитый математик Г. Кантор в прошлом веке доказал, что число точек на отрезке прямой сосчитать никаким способом нельзя. Их нельзя перенумеровать с помощью бесконечного ряда натуральных чисел, приписывая каждой точке свой номер, в каком бы порядке мы ни выбирали эти точки. Всегда останется хотя бы одна точка, на которую не хватит номера!

Понять это не так уж сложно. В самом деле, представим себе, что мы взяли отрезок единичной длины и положение каждой точки характеризуем расстоянием ее от левого конца, принятого за ноль. Эти расстояния будем записывать в виде десятичной дроби. Точнее, положение каждой точки записывается, вообще говоря, в виде бесконечной десятичной дроби, у которой после запятой имеется бесконечный ряд десятичных знаков. Конечно, в исключительных случаях все знаки начиная с некоторого могут оказаться нулями.

Представим далее, что вопреки нашему утверждению кому-то удалось перенумеровать точки этого отрезка. Тогда мы выпишем десятичные дроби, характеризующие положения этих точек на отрезке, в порядке их номеров в виде таблицы. В первой строчке запишем бесконечную дробь для положения точки, получившей первый номер, во второй строчке бесконечную дробь для точки, получившей второй номер и т. д. Наша таблица может выглядеть, например, так

0,32869700833....
0,91967138452....
0,00063700114....

Покажем, что обязательно есть точка отрезка, не вошедшая в этот список, и, следовательно, список неполон. Для того чтобы записать десятичную дробь, характеризующую положение этой точки на отрезке, поступим следующим образом. Запишем первым знаком после запятой в десятичной дроби любую цифру, отличающуюся от первой цифры после запятой в первой строчке нашей таблицы (то есть в нашем примере не 3, а, скажем, 5). Вторую цифру в нашей дроби запишем любую, но отличающуюся

от второй цифры во второй строчке таблицы (в нашем примере не 1); и так далее будем поступать до бесконечности. Ясно, что мы получим дробь, которой нет в нашем списке. Действительно, она не совпадает с первой строчкой, так как заведомо отличается первая цифра после запятой, не совпадает со второй строчкой, так как заведомо отличается вторая цифра после запятой и т. д.

Точка, расстояние которой записано этой дробью, пропущена в нашем бесконечном списке и, значит, не имеет номера.

Казалось бы, можно начать нумеровать с этой точки, а уж потом давать номера всем остальным. Как шутливо замечает голландский математик Г. Фрейденталь, именно так поступил человек, побившийся об заклад съесть 20 картофелин. Съев 19 из них и чувствуя себя не в силах проглотить последнюю картофелину, этот человек со вздохом заметил: «С нее-то мне и следовало бы начать».

Разумеется, если начать нумеровать с только что указанной точки, оставшейся без номера, то тем же способом можно найти другую точку, оставшуюся без номера при новом способе нумерации.

Наверное, читатель несколько устал от необходимости следить за необычным построением, но уж очень оно важно, и хотелось его привести для того, чтобы дать хоть немного почувствовать, насколько необычные свойства мы встречаем в царстве бесконечности.

Итак, точек на единичном отрезке прямой заведомо больше, чем бесконечных чисел натурального ряда. Математики говорят, что бесконечность точек на отрезке прямой более мощная, чем бесконечность чисел натурального ряда.

Значит, бесконечности не все одинаковые. Среди них есть более мощные, то есть более богатые элементами, и менее мощные.

Казалось бы, количество точек на всей прямой заведомо больше, чем количество точек на единичном отрезке. Ведь отрезок — часть прямой. Но мы уже осторожны и помним, что в царстве бесконечности тезис «часть меньше целого» не работает. И действительно, мощности бесконечного числа точек прямой и отрезка одинаковы. Это одинаковые бесконечности!

Более того, бесконечность числа точек на всей плоскости и даже во всем трехмерном пространстве той же мощности, что и на отрезке прямой. Все это одинаковые бесконечности. Может возникнуть подозрение, что раз множество точек всего бесконечного пространства не больше множества точек отрезка, то вообще не существует бесконечного множества еще более мощного. И эта бесконечность наибольшая.

Но это не так. Математики умеют строить множества все более и более мощные, то есть строить все большие и большие бесконечности. Нет наибольшей бесконечности, этот ряд тоже бесконечен.

Остановимся, пожалуй, в самом начале нашего пути в мир бесконечностей. Путешествие в нем, возможно, и не менее увлекательно, чем путешествие в мире черных дыр или в далях Вселенной, но это все же дорога в другом направлении человеческих знаний,

Вернемся к расширению Вселенной. После всего сказанного нас уже не удивляет, что бесконечная Вселенная может бесконечно расширяться и для этого не требуется чего-то вне Вселенной, чего-то «потустороннего».

Подобно тому как в истории Гильберта бесконечное число постояльцев можно было всех переселить только в четные номера, увеличив тем самым вдвое расстояние между ними, так и во Вселенной можно увеличить, скажем, вдвое расстояние между галактиками, оставаясь все в той же бесконечной Вселенной.

Но возникает еще один важнейший вопрос: почему Вселенная именно расширяется? Что придало галактикам скорость? Еще раз напомним, что теория тяготения не отвечает на этот вопрос. Галактики сейчас движутся по инерции, и их скорость тормозится тяготением.

К этому вопросу, о причинах, приведших к расширению Вселенной, мы вернемся в последней главе.

Наконец, еще одно замечание. Иногда приходится слышать утверждение, что вследствие расширения Вселенной расширяется все на свете: не только галактики разбегаются, но и сами галактики расширяются, расширяются отдельные звезды, наша Земля — вообще все тела. Это, конечно, неверно. Разбегание галактик вообще никак не влияет на отдельные тела. Как в разлетающемся облаке газа отдельные молекулы не расширяются, точно так же и в расширяющейся Вселенной гравитационно связанные тела — галактики, звезды, Земля — не подвержены космологическому расширению. Разумеется, они могут и расширяться и сжиматься, но это вызывается внутренними причинами — процессами, которые происходят внутри этих тел.

Расширяется ли вселенная?

Вывод о расширении Вселенной далеко не сразу получил всеобщее признание. Уж очень грандиозна сама идея эволюции всего окружающего мира. И эта идея ведет ко многим удивительным и далеко идущим следствиям, например, что в

далеком прошлом, когда началось расширение, Вселенная была не похожа на сегодняшнюю. Как отмечено в начале главы, такая идея вызывала много возражений, отчасти в силу инертности человеческого мышления, отчасти в силу предвзятых псевдофилософских соображений. Казалось, гораздо привычнее и спокойнее представление о неэволюционирующей, стационарной Вселенной. Все это породило многочисленные попытки дать какое-то иное объяснение наблюдаемому «красному смещению» в спектрах далеких галактик, отличное от объяснений его эффектом Доплера. Тогда можно было бы считать галактики не удаляющимися друг от друга, а Вселенную не расширяющейся.

Очень хорошо это умонастроение отражено в памфлете «Здравый смысл и Вселенная» канадского писателя-юмориста и ученого-экономиста С. Ликока.

> «В течение последних лет, точнее со дня обнародования этой ужасной гипотезы (о расширении Вселенной. — *И. Н.)* мы, кто как мог, пытались жить в этой расширяющейся Вселенной, каждая часть которой с кошмарной скоростью улетает от всех остальных частей! Это напоминает нам того отчаявшегося влюбленного, который вскочил на коня и поскакал, как безумный, в разных направлениях. Идея была величественная, но создавала какое-то ощущение неудобства».

Попытки «отстоять» стационарность Вселенной иногда встречаются и до сих пор; Что же имеет место в действительности? Нет ли какого-то физического процесса, не связанного с разбеганием галактик, но также вызывающего покраснение квантов света — фотонов?

В принципе такие механизмы существуют.

Чтобы квант краснел, он должен отдавать энергию. Это может происходить, когда квант, длительно путешествуя в космосе, сталкивается с электронами межзвездной среды, а в некоторых вариантах гипотезы — сталкивается с другими фотонами в межгалактическом пространстве. Во всех подобных гипотезах фотон при взаимодействии теряет не только энергию, но и изменяет направление своего движения. Значит, постепенно кванты света, летящие от галактики точно на нас, приобретают движение по расходящимся траекториям. Изображения далеких галактик должны становиться размытыми, нечеткими.

Ничего подобного не наблюдается. Уже по этой причине этот эффект не может объяснить «красное смещение». Нет надобности говорить, что при этом потребовалась бы фантастическая плотность межгалактической среды, появились бы другие

наблюдаемые эффекты.

В качестве другого мыслимого механизма покраснения фотонов предлагали гипотетический процесс постепенного распада фотонов с испусканием каких-то частиц. Советский физик М. Бронштейн еще в 30-е годы показал, что если бы такой процесс и существовал (потом выяснилось, что его нет), то вероятность распада фотона была бы обратно пропорциональна частоте. Значит, чем больше длина волны фотона, тем быстрее он должен «краснеть». Кванты радиоволн должны бы краснеть быстрее квантов видимого света. Таким образом, красное смещение спектральных линий в радиоспектрах галактик было бы больше, чем в видимой области спектра. В 60-х годах были проведены точные наблюдения смещения радиолинии с длиной волны 21 сантиметр. Эта линия хорошо видна в радиоспектрах холодного межзвездного газа во многих других галактиках.

У всех 30 галактик, для которых проводились наблюдения, красное смещение в радиодиапазоне оказалось точно таким же, как для волн света, видимого глазом.

Следовательно, предположение о покраснении квантов по причине их старения полностью отпадает.

Единственным возможным объяснением космологического красного смещения является эффект Доплера, вызванный расширением Вселенной.

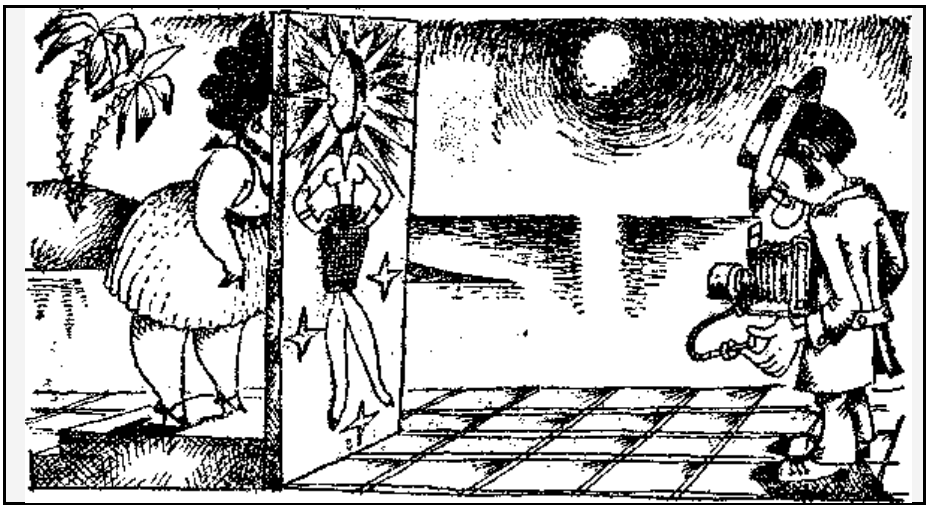
Подчеркнем здесь еще раз, что нестационарность Вселенной была предсказана теоретически до ее экспериментального обнаружения, и открытие красного смещения только подтвердило это предсказание. Удивляться надо не существованию красного смещения и расширению Вселенной (нестационарность ее есть прямое следствие фундаментальных законов физики), а поразительной живучести консервативных взглядов.

Если бы наблюдения показали отсутствие систематического смещения линий в спектрах галактик, то есть отсутствие нестационарности Вселенной, то это означало бы, что законы тяготения нуждаются в уточнении, что какая-то неизвестная универсальная сила во Вселенной мешает тяготению сделать Вселенную нестационарной.

Любопытно, что на самой заре современной космологии, еще до А. Фридмана и Э. Хаббла, попытка введения такой новой силы была сделана А. Эйнштейном. Об этом рассказывается в следующей главе. Нам остается только добавить, что некоторые современные астрофизики указывают на возможность наличия у отдельных квазаров и галактик наряду с космологическим красным смещением, вызванным расширением Вселенной, еще добавочного красного смещения, вызванного другими причинами,

например, сильным гравитационным полем или даже неизвестными еще процессами. В принципе такие явления, конечно, возможны. Однако автору кажется, что наблюдения, приводимые в поддержку этих идей, не имеют доказательной силы и могут быть объяснены естественным путем.

Глава II.
Механика Вселенной



Вселенная в прошлом

Факт расширения Вселенной означает то, что в прошлом она была совсем не похожа на то, что мы видим сегодня. Раз галактики удаляются друг от друга, то в прошлом они должны были практически соприкасаться, а еще раньше не было отдельных галактик. Поделив расстояние между галактиками на скорость их удаления, получаем время, прошедшее с начала расширения. Мы говорили, что галактики на расстоянии миллиона световых лет (1019 километров) удаляются со скоростью около 25 километров в секунду. После деления первого числа на второе получаем 13 миллиардов лет. Так как для вдвое более далеких галактик и скорость удаления вдвое больше, то и для них после деления мы получим то же самое число.

Значит, все галактики начали разлетаться 13 миллиардов лет назад. Мы помним, однако, что в определении расстояния до галактик могут быть некоторые ошибки. Поэтому в оценке времени, прошедшего с начала расширения, тоже есть некоторая неопределенность. Можно сказать, что эта эпоха отстоит от нас в прошлом на 10—20 миллиардов лет.

В расчетах мы принимали, что галактики движутся с постоянными скоростями. В действительности скорость

расширения тормозится тяготением. Однако учет этого обстоятельства мало меняет числа, приведенные выше.

Интересно сопоставить найденное нами время, прошедшее с начала расширения, с возрастом отдельных объектов во Вселенной. Например, возраст так называемых шаровых звездных скоплений в Галактике оценивается в 10—14 миллиардов лет. Возраст нашей Земли и Солнца около 5 миллиардов лет.

Мы видим, что и возраст нашей планеты и, по-видимому, возраст скоплений звезд лишь немногим меньше времени, прошедшего с начала расширения Вселенной.

Итак, в прошлом, 10—20 миллиардов лет назад, вблизи момента начала расширения плотность вещества во Вселенной была гораздо больше сегодняшней. Отдельные галактики, отдельные звезды и т. д. не могли существовать как изолированные тела. Вся материя находилась в состоянии непрерывно распределенного однородного вещества. Лишь позже, в ходе расширения, оно распалось на отдельные комки, что привело к образованию отдельных небесных тел. К этому вопросу мы еще вернемся.

Сразу же возникает целый ряд других вопросов: насколько достоверен вывод о начале расширения, о состоянии огромной плотности всего вещества (как говорят, о сингулярном состоянии), какие процессы протекали в этом сверхплотном веществе, что заставило вещество Вселенной расширяться, наконец, что было до начала расширения, до момента сингулярности?!

Разумеется, все это чрезвычайно важно и интересно, и мы по мере изложения разберем эти проблемы.

Гравитация пустоты

Начало истории научной идеи о гравитации пустоты, или, на современном научном языке, — вакуума, которую мы изложим в этом параграфе, связано все с тем же конфликтом между традиционной верой в неизменность Вселенной и ее нестационарностью, неумолимо вытекающей из теории тяготения.

Закон всемирного тяготения гласит, что любые материальные тела притягивают друг друга. А гравитирует ли вакуум? Этот вопрос в современной физике был поставлен А. Эйнштейном еще в 1917 году. Что такое гравитация вакуума? Почему возник такой вопрос? Какие данные физических экспериментов или астрономических наблюдений заставили его поставить эту проблему? Оказывается, никаких прямых данных не было, а

точнее говоря, именно отсутствие в ту пору данных о движении галактик привело А. Эйнштейна к мысли о гравитации вакуума.

Дело обстояло следующим образом. Вскоре после создания общей теории относительности он попытался построить на ее основе математическую модель Вселенной. Это происходило до работ А. Фридмана, до открытия Э. Хабблом красного смещения в спектрах галактик, и им владела идея стационарности, неизменности мира: «Небеса длятся от вечности к вечности». Однако мы видели, что закон тяготения требует нестационарности Вселенной.

Чтобы уравновесить силы тяготения и сделать мир стационарным, надо ввести силы отталкивания, не зависящие от вещества. Исходя из таких соображений, А. Эйнштейн ввел космическую силу отталкивания, которая делала мир стационарным. Ускорение, которое космическая сила отталкивания должна сообщить телам, универсально, оно не зависит от масс тел, а только от расстояния, их разделяющего.

А. Эйнштейн показал, что сила отталкивания должна быть пропорциональна расстоянию между телами. Коэффициент пропорциональности называют космологической постоянной. Чтобы в межгалактических просторах уравновесить силу тяготения обычной материи силами отталкивания, космологическая постоянная должна бы быть очень мала.

Мы позже остановимся вкратце на возможных физических причинах возникновения сил отталкивания. Сейчас только скажем, что эта причина связана с квантовыми процессами, происходящими в вакууме.

В принципе силы отталкивания, если они, конечно, существуют в природе, можно было бы обнаружить в достаточно точных лабораторных опытах. Однако малость величины космологической постоянной делает задачу ее лабораторного обнаружения совершенно безнадёжной. Действительно, легко подсчитать, что при свободном падении тела на поверхность Земли добавочное ускорение, сообщаемое силами отталкивания, на 30 порядков (!) меньше самого ускорения свободного падения. Даже в масштабе Солнечной системы или всей нашей Галактики эти силы ничтожно малы по сравнению с силами тяготения. Так, нетрудно подсчитать, что ускорение, сообщаемое Земле тяготением Солнца, равно 0,5 см/с^2. В то же время ускорение космического отталкивания между Землей и Солнцем в 10^{22} раз меньше! Разумеется, это отталкивание (если оно есть вообще)- никак не сказывается на движении тел Солнечной системы и может быть обнаружено только при исследовании движений самых отдаленных наблюдаемых галактик.

Так в уравнениях тяготения Эйнштейна появилась космологическая постоянная, описывающая силы отталкивания вакуума. Действие этих сил столь же универсально, как и сил всемирного тяготения, то есть оно не зависит от физической природы тела, на котором проявляется, поэтому логично назвать это действие гравитацией вакуума, хотя обычно под гравитацией понимают притяжение, а здесь мы имеем отталкивание.

Через несколько лет после работы А. Эйнштейна была создана, как мы уже знаем, теория Фридмана. После чего А. Эйнштейн стал склоняться к мысли, что космологическую постоянную не следует вводить в уравнения тяготения, если их решение для всего мира можно получить и без этой постоянной.

После открытия красного смещения в спектрах галактик, доказывающего расширение Вселенной, какие-либо основания предполагать, что в природе существуют космические силы отталкивания, отпали. Правда, решение, описывающее расширяющийся мир, можно получить и для уравнений с космологической постоянной. Для этого достаточно предположить, что силы тяготения и отталкивания не компенсируют точно друг друга; тогда преобладающая сила приведет к нестанционарности. Это было отмечено еще в пионерских работах А. Фридмана. Наблюдения красного смещения во времена Э. Хаббла были недостаточно точны, чтобы определить, какое решение осуществляется в природе: с космологической постоянной или без нее. Тем не менее многие физики с неприязнью поглядывали на космологическую постоянную в уравнениях, поскольку она осложняла теорию и ничем не была оправдана. Сам А. Эйнштейн и многие другие физики предпочитали писать уравнения тяготения без нее, и он даже назвал введение космологической постоянной в свои уравнения «самой грубой ошибкой в своей жизни».

Мы увидим в дальнейшем, что то, что он считал своей ошибкой, на самом деле являлось первым шагом к пониманию природы физических взаимодействий элементарных частиц, к пониманию природы пустоты — физического вакуума. Но в начале нашего века его отказ от космологической постоянной казался естественным.

Однако космологи 30-х годов не отказались столь поспешно от космологической постоянной. Для сохранения ее у них были серьезные основания. Вспомним, что первые определения постоянной Хаббла давали значения, завышенные раз в десять. Если бы мы с ее помощью рассчитали время, прошедшее с начала расширения Вселенной, то получили бы всего 1—2 миллиарда лет вместо правильного значения около 10—20 миллиардов лет.

Два миллиарда лет — срок очень короткий. Во-первых, он оказывался даже меньше возраста Земли. Во-вторых, что гораздо более существенно, возраст звезд и звездных систем тогда ошибочно оценивался в десять тысяч миллиардов лет, то есть на четыре порядка больше времени расширения Вселенной.

Сегодня мы знаем, что время с начала расширения занижено примерно в 10 раз, а возраст звезд, наоборот, завышен более чем на два порядка. И с сегодняшней точки зрения никакого противоречия между этими возрастами нет. Однако в 30-е годы указанное различие рассматривалось как серьезное противоречие.

Для приведения в соответствие времени расширения Вселенной с возрастом звезд была привлечена космологическая постоянная. Так идея универсального космического отталкивания начала переживать период «второй молодости».

Посмотрим, как введение космологических сил отталкивания может привести к резкому изменению времени расширения Вселенной.

Предположим, что космологическая постоянная отлична от нуля. Пусть мир расширяется от состояния очень высокой плотности. Так как вначале плотность вещества велика, силы тяготения, пропорциональные плотности и тормозящие расширение, много больше сил отталкивания.

В ходе расширения рано или поздно плотность упадет настолько, что силы тяготения и отталкивания сравняются. В этот момент мир по инерции будет расширяться без ускорения, с постоянной скоростью. Если эта скорость очень мала, то очень долго будет поддерживаться почти полное равенство сил тяготения и отталкивания и, следовательно, период почти полной остановки расширения, или, как его называют, задержки расширения, будет длительным. Затем плотность вещества все же постепенно упадет и силы тяготения станут меньше сил отталкивания. Теперь мир уже будет расширяться ускоренно под действием сил отталкивания. Подбирая параметры модели, можно сделать задержку расширения очень длительной. Согласно этой гипотезе задержка в расширении была в прошлом. Сегодня мир расширяется ускоренно.

Так, введение космологической постоянной растягивает время расширения Вселенной и может привести его в соответствие с возрастом звезд.

Оценки постоянной Хаббла были пересмотрены в 50-х годах. Еще раньше, в конце 30-х годов, было установлено, что превращение водорода в гелий является основным источником энергии звезд, а в 50-х годах построена современная теория звездной эволюции. Все противоречия с возрастами отпали,

отпала и необходимость в космологической постоянной. Уже во второй раз!

А в 1967 году начался период «третьей молодости» идеи о космологической постоянной. К этому времени астрономы открыли и исследовали необычайные объекты — квазары, о которых мы кратко говорили в первой части.

Квазары до сих пор хранят множество тайн и нерешенных проблем. Мы остановимся здесь лишь на двух особенностях квазаров. Во-первых, они обладают огромной светимостью и видны с расстояний даже больше, чем далекие галактики. Чем дальше квазар, тем должен быть меньше его видимый блеск на небе, ослабленный этим расстоянием. В то же время квазары должны подчиняться законам расширения Вселенной и чем дальше, тем с большей скоростью удаляться от нас, а значит, сильнее должно быть в их спектрах «красное смещение».

Итак, при изучении квазаров, ожидалось, что чем меньше их видимый блеск, тем сильнее красное смещение.

Ничего подобного не обнаружили! Для объяснения этого американские ученые В. Петросян, Э. Сальпетер и П. Шекере предположили, что возможной причиной отсутствия зависимости между видимым блеском квазаров и красным смещением в их спектрах могут явиться космические силы отталкивания. Поясним это.

Американские ученые подчеркивали, что квазары, как правило, наблюдаются на огромных расстояниях, гораздо дальше, чем самые далекие галактики, доступные телескопам. Когда мы наблюдаем квазары с большим красным смещением, то есть на больших расстояниях, мы видим свет, давно испущенный. Если он покинул квазары в эпоху, соответствующую задержке расширения Вселенной в теории с космологической постоянной, то и у более близкого, и у более далекого квазара красное смещение будет почти одним и тем же. Это происходит потому, что наблюдения относятся к периоду, когда мир почти не расширялся.

Действительно, пусть свет покинул квазар в эпоху задержки расширения. Он долго идет в почти не расширяющейся Вселенной и поэтому не краснеет. Когда этот луч находится еще на пути к нам, из более близкого квазара выходит луч, который затем одновременно с первым уже в нашу эпоху достигнет наблюдателя на Земле. Оба луча идут вместе в почти стационарной Вселенной и не краснеют. Свет обоих квазаров одинаково покраснеет позже — после окончания эпохи задержки расширения, уже в расширяющейся Вселенной. Следовательно, и относительно близкий, а потому яркий квазар, и далекий — слабый будут обладать почти одинаковым красным смещением. В результате

многие квазары будут обладать похожими красными смещениями в спектрах, а видимый блеск их будет весьма различным, и никакой зависимости между этими величинами не окажется.

Аргументы в пользу картины расширения Вселенной с длительной задержкой в прошлом (а значит, в пользу существования космологической постоянной) приводили советские астрофизики И. Шкловский и Н. Кардашев, использовавшие другие особенности в спектрах квазаров.

Была ли в действительности задержка в расширении Вселенной в прошлом? Ответ могли дать только новые наблюдения.

Со времени дискуссии этой проблемы прошло почти двадцать лет. Проведено много новых наблюдений квазаров. Постепенно аргументы в пользу задержки расширения начали «рассасываться», как говорят астрономы-профессионалы на своем жаргоне. Новые наблюдения показали, что отсутствие зависимости между видимым блеском квазаров и красным смещением связано с тем, что истинная светимость их очень и очень разнообразна. Их никак нельзя рассматривать как «стандартные свечи» (в отличие от ярчайших галактик в скоплениях) и поэтому нельзя ожидать проявления рассматриваемой зависимости. Точно так же, как если бы мы взяли свечи самой разной истинной яркости, то их видимый блеск никак не характеризовал бы их расстояние от нас.

Отпали и другие аргументы в пользу расширения с задержкой, а с ними отпала и необходимость в существовании космологической постоянной. Отпала уже в третий раз!

Но, как говорят, джинна, выпущенного из бутылки, нелегко загнать обратно. Идея о том, что космологическая постоянная не равна нулю, оказалась живучей.

Ясно одно, что если космологическая постоянная и отличается от нуля, то очень мало. Но доказать, что она точно равна нулю, путем наблюдений, конечно, очень трудно. Может быть, действительно существуют космические силы отталкивания?

Это заставляет физиков задуматься над природой таких сил. Подробнее мы будем говорить об этом в разделе «Почему Вселенная такая». Сейчас отметим только, что энергия взаимодействия виртуальных частиц вакуума (об этом мы говорили в главе «Черные дыры и кванты» в 1-й части) приводит к тому, что в пустоте может быть все время хоть и малая, но отличная от нуля плотность энергии. Свойства вакуума таковы, что вместе с плотностью энергии должны появиться и натяжения (как могут быть натяжения в упругом теле). Вот присутствие этих

натяжений и приводит, как можно показать, к возникновению универсальных гравитационных сил отталкивания, о которых мы говорили.

Подчеркнем, что физикам далеко еще не все ясно с природой вакуума.

В последнее время развитие теории физики элементарных частиц делает вероятным заключение о том, что в нашу эпоху и в обозримом прошлом силы гравитации вакуума вряд ли играли заметную роль в эволюции Вселенной. Но вот вблизи самого начала расширения, в первые мгновения, возможно, их роль была определяющей, свойства вакуума там были совеем другие. Об этом, как уже сказано, мы поговорим далее, а здесь заметим, что настало, по-видимому, время «четвертой молодости» идеи о космологической постоянной.

Наверное, у читателя осталось чувство какого-то скептицизма по отношению к специалистам, которые то находят аргументы в пользу идей о гравитации вакуума, то находят аргументы против нее, то опять за, и так много раз. Не подрывают ли такие колебания веру в надежность научных исследований, веру в науку? О похожей ситуации высказался в уже цитированном памфлете С. Ликок: «Не подумайте, что я высказываю неверие в науку или неуважение к ней (в наши дни это было бы так же чудовищно, как во времена Исаака Ньютона не верить в Святую Троицу). Но все же... Так что подхватывайте свои книжки, следите за развитием науки и ждите следующего астрономического конгресса».

Ну что ж, если оставить шутки, то в истории науки такое положение известно. К какой-нибудь научной идее подходят с разных сторон, на разном уровне развития физики, с разной степенью вооруженности. Штурмуют сложнейшую проблему много раз, пока не решат ее. И, как правило, за ней появляются проблемы еще более глубокие и сложные.

Загадка вакуума относится к такого рода проблемам.

Будущее расширяющейся вселенной

Итак, вероятно, космологическая постоянная не влияет сегодня на расширение Вселенной. Будем считать ее равной нулю, как это полагал А. Эйнштейн, и посмотрим, как будет протекать расширение в будущем. Расширение Вселенной протекает с замедлением из-за тяготения, и для будущего есть две возможности. Если тяготение слабо тормозит расширение, то в будущем оно будет продолжаться неограниченно. Расстояние между скоплениями галактик неограниченно увеличивается.

Силы тяготения во Вселенной зависят от средней плотности вещества. (Средней называется плотность, если «размазать» все небесные тела, все облака газа, все галактики равномерно по пространству.) Чем больше средняя плотность, тем больше силы. Значит, при достаточно малой средней плотности масс расширение будет продолжаться вечно. Но возможно, что плотность вещества сегодня достаточно велика, а значит, велико замедление расширения. В результате расширение прекращается в будущем и сменяется сжатием.

Ситуация здесь полностью аналогична той, когда ракета, разогнанная до определенной скорости, должна покинуть небесное тело. Так, скорость в 12 километров в секунду достаточна, чтобы покинуть Землю и улететь в космос, ибо эта скорость больше второй космической скорости для Земли. Однако эта скорость недостаточна для того, чтобы покинуть поверхность Юпитера, где вторая космическая скорость, как мы писали, 61 километр в секунду.

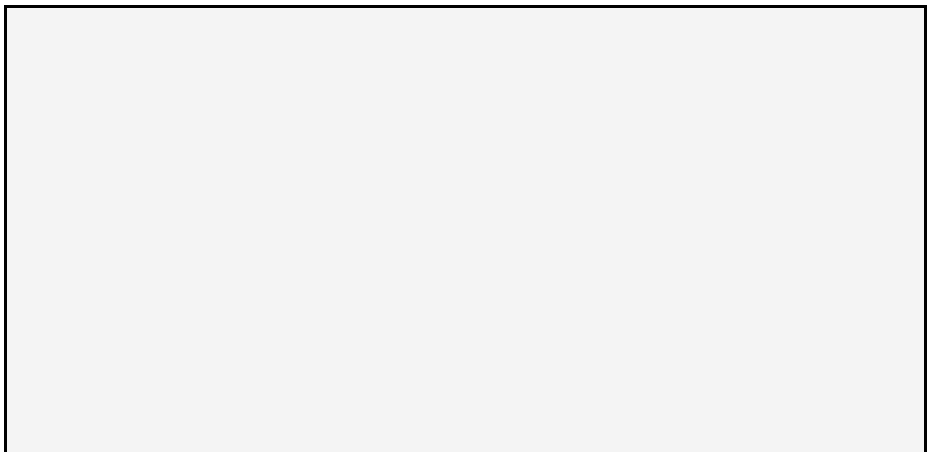
Тело, брошенное на Юпитере со скоростью 12 километров в секунду вверх, после подъема снова упадет на него.

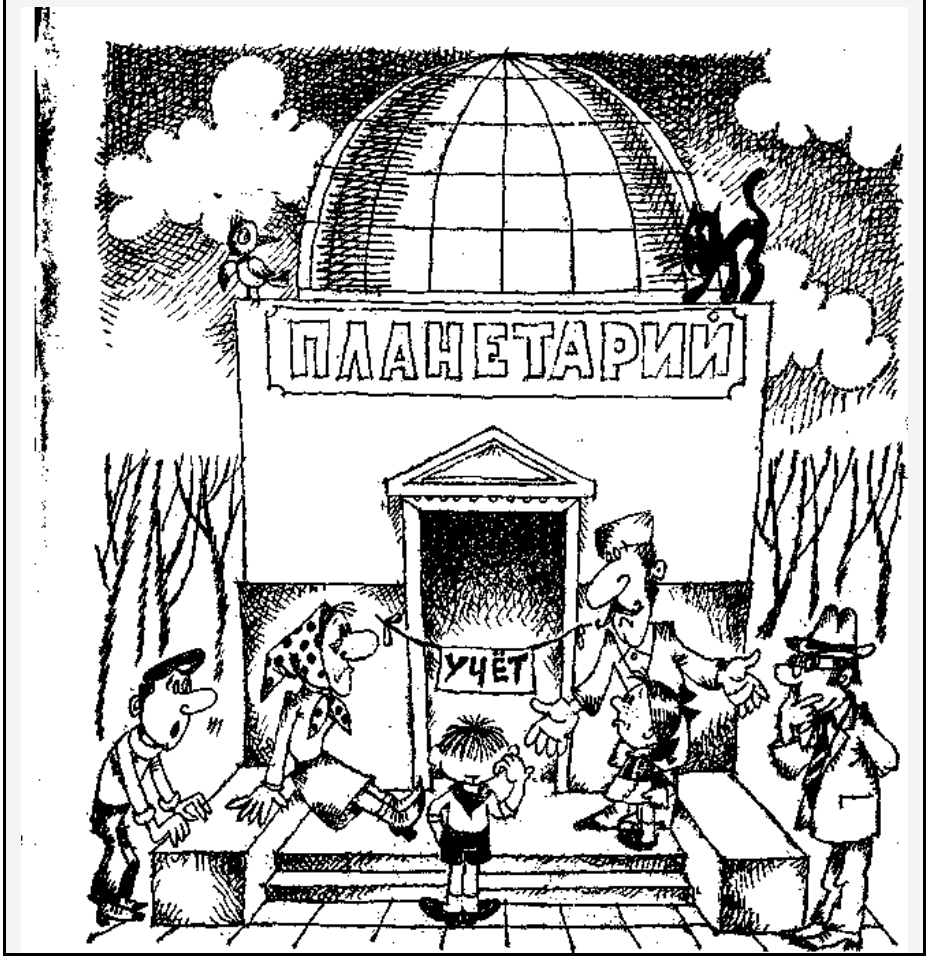
Значит, во Вселенной при нынешней ее скорости расширения (нынешней постоянной Хаббла) есть критическое значение плотности вещества, отделяющее один случай от другого.

Вычисления показывают, что это критическое значение — десять атомов водорода в среднем в одном кубическом метре (или равное количество другого вещества). Если истинное значение плотности во Вселенной больше этого, то расширение сменится в будущем сжатием, если меньше, то расширение вечно.

Что имеет место в действительности?

Оказывается, ответить на этот вопрос не так-то просто. Для этого надо учесть все виды материи во Вселенной, ибо все они создают поле тяготения.





Учесть вещество, входящее в звезды, галактики, светящийся газ можно (хотя это трудная задача). Но, возможно, имеется много труднонаблюдаемой материи между галактиками, которая не излучает (или плохо излучает) свет и не поглощает его.

Учет таких масс, как их называют — скрытых масс, крайне труден,

Поэтому точного и полного ответа на поставленный вопрос нет до сих пор.

Можно сказать лишь следующее. Если учитывать только светящиеся галактики, то средняя плотность вещества во Вселенной в тридцать раз меньше критического значения.

Если бы не было труднонаблюдаемых форм материя, то расширение Вселенной продолжалось бы неограниченно.

Проблема скрытой массы

Астрономы имеют серьезные основания подозревать, что в пространстве между галактиками может быть много труднонаблюдаемых форм материи — много скрытой массы. Может быть, невидимые ореолы скрытой массы окружают даже отдельные галактики.

Одним из поводов для такого подозрения являются результаты измерений масс скоплений галактик. Измерения проводятся следующим образом.

Правильные скопления имеют симметричную форму, распределение галактик в них плавно спадает от центра к краю, и поэтому есть все основания считать, что скопления находятся в равновесном состоянии, когда энергия движений галактик уравновешена силой взаимного тяготения всех масс, входящих в скопление. В этом случае, как мы уже говорили в главе о способах измерения масс, можно определить силу тяготения, а значит, и полную массу всех видов материи, входящих в скопление, ибо все они участвуют в создании поля тяготения.

Такое определение, выполненное, например, для скопления галактик в созвездии Волосы Вероники, приводит к значению $2*10^{15}$ масс Солнца.

Но можно определить массу скопления и другим путем. Для этого надо подсчитать полное число всех галактик, входящих в скопление, и помножить на массу средней галактики. Если так сделать, то получается масса раз в десять меньше, чем при определении первым способом.

Значит, в скоплении должна быть невидимая масса между галактиками, которая и создает дополнительное поле тяготения и учитывается в первом способе, но не входит в галактики и не учитывается во втором способе.

Подобные же результаты получаются и при исследовании других скоплений галактик.

Конечно, при применении обоих способов возможны неизбежные ошибки. Но вряд ли эти ошибки столь велики, что могут объяснить все расхождение в результатах. Тщательный анализ показывает, что «свалить» всю вину за получение парадоксально большой массы в скоплениях на подобные ошибки крайне трудно. Полученные выводы заставляют со всей серьезностью отнестись к поискам скрытой массы, причем не только в скоплениях галактик, но и между скоплениями. В какой форме может существовать скрытая масса? Может быть, это межгалактический газ? Ведь объем пространства между галактиками гораздо больше объема пространства, приходящегося на галактики. Поэтому межгалактический газ, концентрация которого хотя и много меньше, чем у газа внутри

галактик, может в результате все же давать гигантские массы.

Подчеркнем, что межгалактический газ является не единственным кандидатом в скрытые массы. Эти массы могут быть обусловлены и другими видами материи. Такую возможность мы разберем далее. Теперь же вернемся к газу и посмотрим, как его можно обнаружить.

Прежде всего напомним, что газ во Вселенной в основном состоит из водорода. Следовательно, чтобы установить наличие газа в межгалактическом пространстве, надо искать водород. В зависимости от физических условий газ может быть в нейтральном и ионизованном состояниях.

Начнем с оценки возможного количества нейтрального водорода.

Если свет от далекого источника идет через газ с нейтральными атомами водорода, то происходит поглощение атомами излучения на определенных частотах. По этому поглощению можно пытаться обнаружить нейтральный водород на огромных просторах между скоплениями галактик. В качестве источников света используются далекие квазары. Предпринятые попытки показали, что межгалактического водорода в нейтральном состоянии крайне мало. По массе его, по крайней мере, в десятки тысяч раз меньше, чем светящегося вещества в галактиках.

Таким образом, межгалактический газ, если он и есть, должен быть ионизованным, а значит, и сильно нагретым. Как показывает анализ, для этого необходимы температуры больше миллиона градусов. Не следует удивляться, что, несмотря на такую температуру, этот газ практически невидим. Дело в том, что плотность его очень мала, газ прозрачен, излучает мало видимого света. Но все же эта ионизованная высокотемпературная плазма испускает достаточно много ультрафиолетового излучения и мягких рентгеновских лучей.

Горячий газ можно искать по ультрафиолетовому излучению. Есть и другие способы поисков горячего газа между скоплениями.

Однако все методы оказались не очень чувствительны. Горячий газ между скоплениями галактики до сих пор не обнаружен. Вопрос о количестве такого газа, о том, больше ли его усредненная плотность, чем усредненная плотность вещества, входящего в галактики, остается открытым.

Обратимся теперь к газу в скоплениях галактик. Радионаблюдения показывают, что нейтрального водорода в скоплениях ничтожно мало. Однако с помощью рентгеновских телескопов, установленных на спутниках, был обнаружен горячий ионизованный газ в богатых скоплениях галактик. Оказалось, что

этот газ нагрет до температуры в миллион градусов. Его полная масса может доходить до 10^{13} масс Солнца. Число внушительное, но мы видели выше, что полная масса скопления в созвездии Девы гораздо больше — превышает 10^{15} масс Солнца. Таким образом, наличие горячего газа в скоплениях никак не исчерпывает проблемы скрытой массы.

Несколько лет назад у этой пресловутой проблемы выявился еще один аспект.

В последнее время появляется все больше сторонников идеи о том, что галактики могут быть окружены огромными массивными коронами слабо светящихся объектов, которые по их свечению обнаружить крайне трудно. Это могут быть, например, звезды низкой светимости. Масса короны должна влиять на движение карликовых галактик — спутников основной галактики. Именно по этому влиянию и пытаются обнаружить в настоящее время короны галактик. Возможно, что учет этих корон существенно изменит оценку масс галактик в скоплениях и решит проблему скрытой массы. Однако в настоящее время вопрос о коронах галактик еще не решен.

Нам остается еще разобрать вопрос об экзотических кандидатах на роль скрытой массы, таких, как нейтрино, гравитационные волны, а также другие виды материи. К подобным экзотическим возможностям мы вернемся в главе «Нейтринная Вселенная».

Пока же подведем итог.

Общая масса светящейся материи недостаточна, чтобы ее тяготение затормозило расширение Вселенной и обратило его в сжатие. О скрытой массе мы пока знаем слишком мало. Если она и есть, то ее примерно столько, чтобы сделать общую плотность материи во Вселенной равной критической, может быть, чуть больше.

Вероятнее всего, нашей Вселенной предстоит расширение неограниченное или очень большое время в будущем.

Кривое пространство

Мы сейчас увидим, что вопрос о средней плотности материи во Вселенной имеет решающее значение не только для проблемы будущего Вселенной, но и для проблемы ее протяженности. Возможно, эта фраза вызовет настороженность у читателя. Как может возникнуть у материалиста вопрос о протяженности Вселенной? Разве не ясно, что пространство Вселенной продолжается во все стороны вплоть до бесконечности?

Казалось бы, любое иное мнение ведет к представлению о

существовании какой-то границы материального мира, за который начинается нечто нематериальное. На протяжении длительной истории науки только бесконечно простирающееся во все стороны пространство представлялось единственно приемлемым для всякого стихийного материалиста. Аргументы, доказывающие это, были четко сформулированы еще гениальным философом древнего Рима Лукрецием Каром две тысячи лет назад. Он писал в поэме «О природе вещей»:

> Нет никакого конца ни с одной стороны у Вселенной,
> Ибо иначе края непременно она бы имела.
> Края ж не может иметь, очевидно, ничто, если только
> Вне его нет ничего, что его отделяет, чтоб видно было,
> Доколе следить за ним наши чувства способны.
> Если ж должны мы признать, что нет ничего за Вселенной.
> Нет ни краев у нее, и нет ни конца, ни предела
> И безразлично, в какой ты находишься части Вселенной:
> Где бы ты ни был, везде, с того места, что ты занимаешь,
> Все бесконечной она остается во всех направлениях.

С тех пор подобные аргументы о бесконечности и безграничности пространства аккуратно повторялись на протяжении веков.

С сегодняшней точки зрения такое представление кажется наивным. Первый удар по старым взглядам был нанесен теоретическим открытием возможности геометрии, отличной от геометрии Эвклида, которая изучается в школе. Это было сделано великими математиками прошлого века Н. Лобачевским, Я. Бонн, Б. Риманом, К. Гауссом.

Что такое неэвклидова геометрия? Если обратиться к планиметрии, то, оказывается, понять это чрезвычайно просто: эвклидова геометрия изучает свойства геометрических фигур на плоской поверхности, неэвклидова геометрия изучает свойства фигур на искривленных поверхностях, например, на сфере или, скажем, на седлообразной поверхности. На таких искривленных поверхностях уже не может быть прямых линий и свойства геометрических фигур иные, чем на плоскости. Прямые линии заменяются здесь линиями, которые являются кратчайшими расстояниями между точками. Они называются геодезическими линиями. На сфере, например, геодезические линии — это дуги больших кругов. Примером их могут служить меридианы на поверхности Земли. На сфере мы можем чертить треугольники, стороны которых являются геодезическими, рисовать окружности,

можем изучать их свойства. Все это легко себе представить. Трудности с представлением возникают, когда мы обращаемся уже не к двумерной поверхности, а к неэвклидову трехмерному пространству. В таком пространстве свойства призм, шаров и других фигур отличаются от тех, что мы изучали в школе. По аналогии с поверхностями мы можем сказать, что такое пространство искривлено. Однако эта аналогия вряд ли поможет нам представить наглядно искривленное трехмерное пространство. Мы живем в трехмерном пространстве, выпрыгнуть из него не можем (так как вне пространства ничего нет), поэтому нельзя спрашивать: «В чем изгибается наше реальное пространство?» Суть кривизны пространства заключается в изменении его геометрических свойств по сравнению со свойствами плоского пространства, где справедлива геометрия Эвклида.

Читатель, наверное, помнит из раздела о черных дырах, что общая теория относительности приводит к заключению об искривленности пространства в сильных полях тяготения, об изменении его геометрических свойств.

Когда мы обращаемся к огромным просторам Вселенной, то чем больший масштаб рассматриваем, тем больше охватываемая масса вещества и тем сильнее поле тяготения. В больших масштабах мы должны обращаться к теории Эйнштейна, должны учитывать искривление пространства.

И здесь мы сталкиваемся с удивительным обстоятельством. Чтобы понять суть нового явления, вернемся снова к искривленным двумерным поверхностям.

Возьмем кусочек плоскости. Если мы будем добавлять к нему соседние части плоскости все большего размера, то получим всю плоскость, неограниченно простирающуюся в бесконечность.

Выделим теперь на поверхности шара маленький кусочек. Если он очень мал, мы даже не заметим его искривленность. Добавим теперь к этому кусочку соседние, охватывая все большие области. Теперь искривленность уже заметна. Продолжая эту операцию, мы увидим, что наша поверхность из-за кривизны замыкается сама на себя, образуя замкнутую сферу. Нам не удалось продолжить искривленную таким образом поверхность неограниченно до бесконечности. Она замкнулась. Сфера имеет конечную площадь поверхности, но не имеет границ. Плоское существо, ползущее по сфере, никогда не встретит препятствия, края, границы. Но сфера не бесконечна!

Мы наглядно видим, что из-за замкнутости поверхность может быть безгранична, но не бесконечна.

Вернемся к трехмерному пространству. Оказывается, его

искривленность может быть подобна искривленности сферы. Оно может замыкаться само на себя, оставаясь безграничным, но конечным по объему (подобно тому, как сфера конечна по площади).

Конечно, наглядное представление здесь крайне трудно. Но такое может быть. Теперь нам понятно, что аргументы в строфах Лукреция Кара направлены против ограниченности пространства каким-либо барьером, но не против конечности объема пространства — ведь пространство может быть безграничным, но конечным по объему.

Модели Вселенной, построенные А. Фридманом, показывают, что такой случай может иметь место в действительности. Для этого средняя плотность вещества во Вселенной должна быть больше критической. В этом случае пространство оказывается конечным, замкнутым; такую модель называют закрытой.

Если средняя плотность материи во Вселенной равна критической, то геометрия пространства эвклидова. Такое пространство называют плоским. Оно простирается во все стороны до бесконечности и объем его бесконечен.

Наконец, если плотность матери меньше критической, то геометрия пространства тоже искривленная. Но в этом случае геометрия подобна уже не геометрии на сфере, а геометрии на седлообразной поверхности. Это пространство так же неограниченно простирается во все стороны, не замыкается. Его объем бесконечен. Такую модель Вселенной называют открытой. Каков же наш мир?

Напомним, что до сих пор неизвестна надежно средняя плотность вещества в пространстве, неизвестно, больше она критической или меньше.

Поэтому неизвестно, открыта ли наша Вселенная или закрыта.

Идея возможности закрытого мира с замкнутым пространством, конечно, очень необычна. Как и идея эволюции Вселенной, эта идея с трудностями пробивала себе дорогу. Возражения против нее отчасти были обусловлены всей той же инертностью мышления и предвзятыми соображениями, а отчасти недостаточной образованностью сторонников утверждения, что только бесконечный объем пространства совместим с материализмом.

Я помню один из таких жарких споров в мои студенческие времена, проходивший на 6-м Всесоюзном совещании по вопросам космогонии в Москве.

Вот цитата из выступления одного из философов на том совещании: «В самом деле, если предположить, что Вселенная

конечна в пространстве, то сразу же мы сталкиваемся с необходимостью ответить на такие неразрешимые вопросы: как можно представить себе конечную в объеме Вселенную, что лежит за ее пределами...»

Как видите, аргументация здесь гораздо примитивнее, чем у Лукреция Кара и основана только на обращении к здравому смыслу, что, как уже давно известно, не является аргументом в споре.

Никаких идеалистических выводов из факта, возможности замкнутости пространства, конечно, не следует.

Материализм исходит из факта объективности пространства, из того, что материя может существовать только в пространстве. «В мире нет ничего, кроме движущейся материи, и движущаяся материя не может двигаться иначе, как в пространстве и во времени» (В. И. Ленин). Установление же конкретных свойств пространства, и, в частности, бесконечен его объем или конечен, — дело естественных наук.

Характерна в этом отношении реплика академика В. Гинзбурга на одной из научных дискуссий: «Не количеством кубических сантиметров определяется идеология!»

Подобные споры ушли в прошлое, и дело за наукой — определить истинную структуру мира.

Искривленность пространства определяется степенью отличия плотности материи от критического значения. Чем сильнее отличие, тем больше искривление. Наблюдения показывают, что если плотность материи и отличается от критической, то не очень сильно и искривленность сказывается только на огромных расстояниях во многие миллиарды световых лет. В замкнутом пространстве Вселенной кратчайшая линия — геодезическая — оказывается замкнутой, подобно большому кругу на сфере (например, подобно экватору). Скользя вдоль такого пути, мы возвращаемся в исходную точку, точно так же, как, двигаясь по экватору и обойдя Землю, приходим в исходный пункт нашего путешествия.

Возможно, будущие наблюдения покажут, что плотность материи больше критической и Вселенная замкнута. В этом случае объем Вселенной конечен, но все же огромен, размеры Вселенной колоссальны. Длина «экватора» — геодезической линии, охватывающей всю Вселенную, — никак не меньше нескольких десятков миллиардов световых лет, а вероятно, гораздо больше.

Конечно, есть не меньшие основания ожидать, что плотность материи во Вселенной не превышает критическую и объем Вселенной бесконечен.

В следующем разделе мы увидим, что различие между открытой и закрытой Вселенной не столь драматично, как это кажется с первого взгляда.

Горизонт

Вселенная начала расширяться около 15 миллиардов лет назад. Значит, во Вселенной не может быть объектов более старых, чем 15 миллиардов лет, не может быть источников, которые светят дольше 15 миллиардов лет. Это обстоятельство ведет к важнейшему следствию — к наличию горизонта видимости во Вселенной. Чем дальше от нас находится галактика, тем больше времени потребовалось свету, чтобы достичь наблюдателя. Свет, который сегодня достигает наблюдателя, покинул галактику в далеком прошлом. Вселенная начала расширяться около 15 миллиардов лет назад. Свет, вышедший из какого-либо источника даже вскоре после начала расширения мира, успеет пройти лишь конечное расстояние во Вселенной — около 15 миллиардов световых лет. Точки пространства Вселенной, лежащие от нас на этом расстоянии, называют горизонтом видимости. Области Вселенной, лежащие за горизонтом, сегодня принципиально ненаблюдаемы. Мы не можем увидеть более далекие галактики: какими бы телескопами мы ни наблюдали, свет от галактик из-за горизонта просто не успел до нас дойти. Красное смещение света неограниченно нарастает, когда мы наблюдаем объект, лежащий все ближе и ближе к горизонту. На самом горизонте оно бесконечно. Таким образом, мы можем видеть только конечное число звезд и галактик во Вселенной.

До создания теории расширяющейся Вселенной попытки рассмотрения бесконечного пространства, равномерно в среднем заполненного звездами, наталкивались на любопытный парадокс. Он заключается в следующем. В бесконечной Вселенной, заполненной звездами, луч зрения рано или поздно встретит светящуюся поверхность звезды. В этом случае все ночное небо должно сиять, как поверхность Солнца и звезд.

Парадокс получил название фотометрического, и многие выдающиеся умы пытались его разрешить.

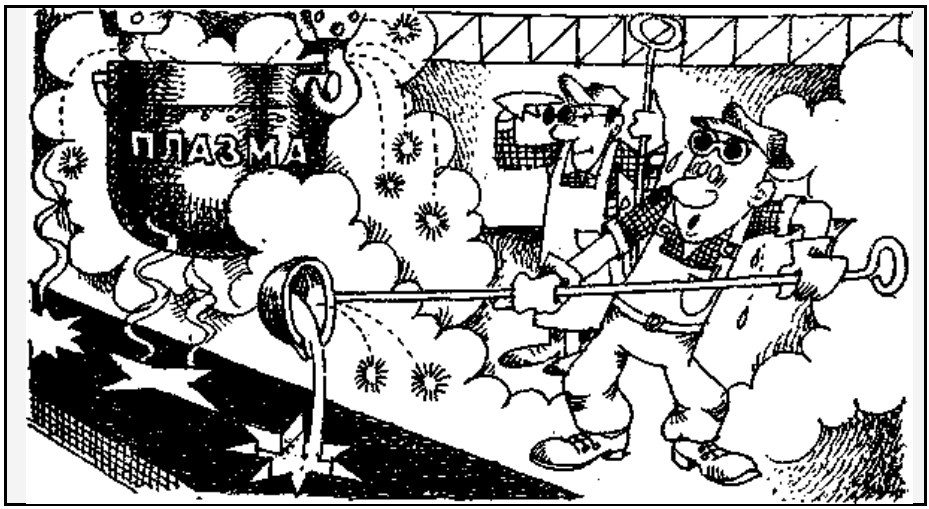
После создания теории расширяющейся Вселенной парадокс разрешился сам собой. В расширяющейся Вселенной для каждого наблюдателя есть горизонт видимости. Поэтому он видит конечное число звезд, весьма редко разбросанных в пространстве. Наш взор, как правило, скользит мимо них и вплоть до горизонта, не упираясь ни в одну звезду. Поэтому ночное небо между

звездами — темное. К тому же жизнь звезд ограничена. Горизонт видимости делает для нас не столь существенной разницу между закрытым и открытым миром. В обоих случаях мы видим ограниченную часть Вселенной с радиусом около 15 миллиардов световых лет. В замкнутом мире свет не успевает обойти мир к настоящему времени, и, конечно, невозможно увидеть свет от нашей собственной галактики, обошедшей весь мир. Увидеть «собственный затылок» невозможно в замкнутой Вселенной. Даже за весь период расширения от сингулярного состояния до смены расширения сжатием свет успевает пройти только половину замкнутого пространства и лишь на фазе сжатия сможет закончить полный обход мира...

Горизонт видимости для каждого наблюдателя свой, где бы он ни был во Вселенной. Все точки однородной Вселенной равноправны. С течением времени горизонт каждого наблюдателя расширяется, к наблюдателю успевает доходить свет от все новых областей Вселенной. За 100, лет радиус горизонта увеличивается на одну стомиллионную долю своей величины.

Еще одно замечание. Вблизи, самого горизонта мы в принципе должны видеть вещество в далеком прошлом, когда плотность его была гораздо больше сегодняшней. Отдельных объектов тогда не было, а вещество было непрозрачным для излучения. К этому вопросу мы еще вернемся.

Глава III.
Горячая Вселенная



Физика начала расширения

В предыдущих главах мы познакомились с механикой расширения Вселенной. Но механика не исчерпывает всего, что нас интересует. На разных этапах расширения Вселенной в ней протекали различные физические процессы. Мы знаем, что 15 миллиардов лет назад, в начале расширения, плотность материи во Вселенной была огромна. Естественно, что тогда протекали физические процессы, совсем непохожие на те, что мы наблюдаем сегодня. Они в прошлом определили сегодняшнее состояние мира и сделали возможным, в частности, существование жизни.

Физика процессов в начале расширения вызывает огромный интерес. Но можем ли мы что-либо сказать об этих процессах? Ведь речь идет буквально о первых мгновениях расширения, а все это происходило 15 миллиардов лет назад!

Оказывается, можем.

Дело в том, что происходившие в первые секунды с начала расширения процессы имели столь важные последствия для сегодняшней Вселенной, оставили столь явные «следы», что по ним можно восстановить характер самих процессов.

Важнейшими из них были ядерные реакции между элементарными частицами, проходившие при большой

плотности. Такие реакции возможны лишь в самом начале расширения, когда плотности огромны. Конечно, никаких нейтральных атомов и даже сложных атомных ядер тогда не было, химические элементы образовались позднее в результате ядерных реакций. Но до этого, в еще более ранней Вселенной, был период, когда образовались сами элементарные частицы. Здесь речь идет уже о временах, исчисляемых невообразимо малыми мгновениями — 10^{-43} секунды, когда плотности были больше 10^{93} г/см^3. Такая плотность в невообразимое число раз больше плотности атомного ядра, которая «всего» 10^{-15} г/см^3. Наверное, столь обескураживающие числа вызывают невольную улыбку у читателя. Разве можно что-либо узнать о процессах в таких условиях, которые абсолютно невоспроизводимы в земных лабораториях?

Много лет назад, когда мы писали научную монографию с академиком Я. Зельдовичем и приводили в ней классификацию процессов, протекавших в подобных условиях чудовищных плотностей, мы вспомнили пародию Аркадия Аверченко: «История мидян темна и неизвестна, ученые делят ее тем не менее на три периода: первый, о котором ничего не известно; второй — о котором известно почти столько же, сколько о первом, и третий, который последовал за двумя предыдущими».

За прошедшие с тех пор почти двадцать лет физика шагнула далеко вперед, и теперь даже о процессах формирования элементарных частиц в расширяющейся Вселенной уже можно кое-что сказать.

Что же касается ядерных реакцией, происходивших с первой по трехсотую секунды после начала расширения, то о них можно поведать почти все с полной определенностью. Дело в том, что следствием ядерных реакций явилось образование химических элементов во Вселенной.

Расчет ядерных реакций дает возможность предсказать химический состав вещества, из которого формируются галактики, звезды, межзвездный газ. Сравнение предсказания с наблюдениями позволяет выявить эти реакции, а главное — выяснить физические условия, в которых они происходили. Мы оставим до дальнейших параграфов выяснение вопроса об экзотических процессах при 10^{93} г/см^3, и посмотрим сначала, как протекали ядерные реакции во Вселенной в первые секунды и к чему они привели.

Холодное или горячее начало?

Есть две принципиальные возможности для условий, в

которых протекало начало расширения вещества Вселенной. Это вещество могло быть либо холодным, либо горячим. Мы увидим, что следствия ядерных реакций при этом в корне отличаются друг от друга. Исторически первым еще в 30-е годы нашего века была рассмотрена возможность холодного начала. Тогда ядерная физика находилась еще в зачаточном состоянии, не было теории, которая могла бы надежно рассчитать ядерные реакции. В этих условиях принималось, что вещество Вселенной было сначала в виде холодных нейтронов.

Позже выяснилось, что такое предположение приводит к противоречию с наблюдениями.

Дело заключается в следующем. Нейтрон — нестабильная частица. В свободном состоянии от распадается за время около 15 минут на протон, электрон и антинейтрино. Поэтому в ходе расширения Вселенной нейтроны стали бы распадаться, стали бы возникать протоны. Возникший протон стал бы соединяться с еще оставшимся нейтроном, давая ядро атома дейтерия. Затем дейтерий стал бы соединяться с дейтерием и так далее. Реакция усложнения атомных ядер стала бы быстро идти и продолжаться до тех пор, пока не образовалась бы альфа-частица — ядро атома гелия. Более сложные атомные ядра, как показывают расчеты, практически не возникали бы. Таким образом, все вещество превратилось бы в гелий. Этот вывод резко противоречит наблюдениям. Известно, что молодые звезды и межзвездный газ состоят в основном из водорода, а не из гелия.

Таким образом, наблюдения распространенности химических элементов в природе отвергают гипотезу о холодном начале расширения Вселенной.

В 1948 году появилась работа Г. Гамова, Р. Альфера и Р. Хермана, в которой предлагался «горячий» вариант начальных стадий расширения Вселенной. Предполагалось, что в начале расширения температура вещества была весьма велика.

Основная цель авторов гипотезы горячей Вселенной заключалась в том, чтобы, рассматривая ядерные реакции в начале космологического расширения, получить наблюдаемое в настоящее время соотношение между количеством различных химических элементов и изотопов.

Почему первоначально предполагалось, что все химические элементы должны образоваться в начале расширения Вселенной? Дело в том, что в 40-е годы ошибочно считали, что время, протекшее с начала расширения, составляет 1—4 миллиарда лет (вместо 15 миллиардов лет по современным оценкам). Как мы знаем, это было связало с заниженными оценками расстояний до галактик и поэтому с завышением постоянной Хаббла. Сравнивая

это время (1—4)*10^9 лет с возрастом Земли — порядка (4—6)*10^9 лет, авторы предполагали, что даже Земля и планеты (не говоря уже о Солнце и звездах) сконцентрировались из первичного вещества, и все химические элементы образовались на ранней стадии расширения Вселенной, ибо больше они нигде не успевали образоваться. Теперь мы знаем, что время расширения Вселенной 15*10^9 лет. Земля образовалась не из первичного вещества, а из вещества, прошедшего стадию ядерных реакций (нуклеосинтеза) в звездах. Теория нуклеосинтеза в звездах успешно объясняет основные законы распространенности элементов в предположении, что первые звезды образовались из вещества, состоящего главным образом из смеси водорода и гелия. Вещество из старых звезд первого поколения, обогащенное тяжелыми элементами, выбрасывалось в пространство. Из этого вещества возникали новые звезды, планеты. Таким образом, необходимость объяснения происхождения всех элементов (в том числе и тяжелых — железа, свинца и т. д.) на ранней стадии расширении Вселенной отжала. Но суть гипотезы горячей Вселенной оказалась правильной.

Многие исследователи отмечали, что содержание гелия в звездах и газе нашей Галактики гораздо больше, чем это можно объяснить нуклеосинтезом в звездах. (Подробнее об этом говорится далее.) Следовательно, синтез гелия должен происходить на раннем этапе расширения Вселенной. Но все же основным веществом Вселенной и сейчас является водород.

В теории, предложенной Г. Гамовым и его соавторами, оказывается, что расширяющееся вещество Вселенной превращается в смесь, большая часть которой составляет водород (70 процентов) и меньшая — гелий (30 процентов). Из этого вещества позже и формируются звезды и галактики. Почему же в теории горячей Вселенной все вещество не превращается в гелий, как это было в варианте начала в виде холодной нейтронной жидкости?

Все дело именно в том, что вещество было горячим. В горячем веществе имеется много энергичных фотонов. Имеются там также протоны и нейтроны, которые стремятся соединиться в дейтерий. Однако фотоны разбивают дейтерий, который образуется при слиянии протона и нейтрона, обрывая в самом начале цепочку реакций, ведущую к синтезу гелия. Когда Вселенная, расширяясь, достаточно охлаждается (до температуры меньше миллиарда градусов), то некоторое количество дейтерия уже сохраняется и приводит к синтезу гелия. Мы подробно рассмотрим этот процесс далее.

Теория горячей Вселенной дает определенные предсказания о

содержании гелия в дозвездном веществе. Как уже упоминалось, распространенность гелия должна быть около 30 процентов по массе.

На гипотезе Гамова исследования разных вариантов начала расширения Вселенной не закончились. В начале 60-х годов были сделаны попытки вернуться к модернизированному варианту холодной Вселенной, который предсказывал превращение всего вещества не в гелий (как в прежнем варианте), а в чистый водород. При этом предполагалось, что остальные элементы формировались гораздо позже уже в звездах.

Первоначально теории горячей и холодной Вселенной связывались с попытками дать полное объяснение распространенности химических элементов в дозвездном веществе. Попытки выяснить, какая теория верна, сначала направлялись в основном по пути анализа наблюдений распространенности химических элементов. Однако такие наблюдения и в особенности их анализ очень сложны и зависят от многих предположений. Если бы теории можно было проверять только по распространенности химических элементов во Вселенной, то выявить истину было бы сложно. Ведь не так-то просто разобраться, сколько гелия и других элементов синтезировано в ядерных процессах в звездах, а сколько осталось от процессов в ранней Вселенной.

К счастью, есть другой способ проверки. Теория горячей Вселенной дает важнейшее наблюдательное предсказание, которое является прямым следствием «горячести». Это предсказание существования во Вселенной в нашу эпоху электромагнитного излучения, оставшегося от той эпохи, когда вещество в прошлом было плотным и горячим.

В процессе космологического расширения вещества температура его падает, падает и температура излучения, но все же и к настоящему моменту должно остаться электромагнитное излучение с температурой (в разных вариантах теории) от долей градуса до 20—30 градусов по Кельвину (физики говорят — Кельвинов).

Такое излучение, которое должно остаться с древних эпох эволюции Вселенной, если она действительно была горячей, получило название реликтового. Это название было впервые предложено советским астрофизиком И. Шкловским. Электромагнитное излучение со столь малой температурой представляет собой радиоволны с длиной волны в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Решающим экспериментом по проверке того, была ли Вселенная горячей или холодной, являются, следовательно, поиски такого излучения. Если оно

есть, Вселенная была горячей, если его нет — холодной.

Как было открыто реликтовое излучение

История открытия реликтового излучения весьма поучительна. Уже в первых работах Г. Гамова, Р. Альфера, Р. Хермана было отмечено, что во Вселенной должно остаться от ранних эпох реликтовое излучение с температурой около 5 градусов абсолютной шкалы Кельвина. Казалось бы, это предсказание должно было обратить на себя внимание астрофизиков, а те, в свою очередь, должны были заинтересовать радиоастрономов, с тем чтобы попытаться обнаружить предсказанное излучение. Но ничего подобного не произошло. Историки науки и специалисты до сих пор гадают, почему никто не пытался сознательно искать реликтовое излучение. Прежде чем обращаться к этим догадкам, давайте проследим цепь фактических событий, приведших к самому открытию.

В 1960 году в США была построена радиоантенна, предназначенная для приема отраженных сигналов от спутника «Эхо». К 1963 году эта антенна уже была не нужна для работы со спутником, и два радиоинженера, Р. Вилсон и А. Пензиас, в лаборатории компании «Белл» решили использовать ее для радиоастрономических наблюдений. Антенна представляла собой 20-футовый рупорный отражатель. Вместе с новейшим приемным устройством этот радиотелескоп был в то время самым чувствительным инструментом в мире для измерения радиоволн, приходящих из космоса с широких площадок на небе. Телескоп предназначался в первую очередь для измерения радиоизлучения, рождающегося в межзвездной среде нашей Галактики. Эта работа должна была быть интересной, но в общем-то ординарной среди большого количества радиоастрономических наблюдений. Во всяком случае, А. Пензиас и Р. Вилсон не собирались искать никакое реликтовое излучение, да и о самой теории горячей Вселенной они тогда и слыхом не слыхивали.

Первые измерения проводились на длине волны 7,35 сантиметра.

Для точного измерения радиоизлучения Галактики необходимо было учесть все возможные помехи. Такие помехи могут быть разного рода. Так, их вызывает рождение радиоволн в земной атмосфере, радиоизлучает также и поверхность Земли. Кроме того, помехи вызываются движением электрических частиц в антенне, в усилительных электрических цепях и приемнике. Все возможные источники помех были тщательно проанализированы и учтены.

Тем не менее А. Пензиас и Р. Вилсон с удивлением констатировали, что, куда бы их антенна ни была направлена, она воспринимает какое-то излучение постоянной интенсивности. Это не могло быть излучением нашей Галактики, ибо в этом случае интенсивность его менялась бы в зависимости от того, смотрит ли антенна вдоль плоскости Млечного Пути или поперек. Кроме того, в этом случае ближайшие к нам галактики, похожие на нашу, тоже излучали бы на длине волны 7,35 сантиметра. Но такого их излучения обнаружено не было.

Оставалось две возможности: либо это «шумят» какие-то неучтенные помехи, либо это излучение, приходящее из далеких просторов космоса. Подозрения пали на возможные помехи в антенне. Так возникла «загадка антенны». Предоставим далее слово одному из авторов измерений, Р. Вилсону, рассказывающему, как они проверяли возможность помех, возникающих в антенне. «Таким образом, антенна у нас оставалась единственным возможным источником избыточного шума... Большая часть потерь антенны происходила в ее горловине маленького диаметра, которая была сделана из химически чистой меди. Мы исследовали подобные волноводы в лаборатории и внесли исправления в расчеты потерь за счет неидеальности поверхностных условий, которую мы обнаружили в таких волноводах. Остальная часть антенны была сделана из склепанных алюминиевых листов, и, хотя мы не ожидали здесь каких-либо неприятностей, мы не могли исключить возможности потерь в местах склепки. Чтобы проверить это, мы поместили пару голубей в той небольшой части рупора, где она соприкасается с теплой кабиной. Вскоре они подобно своим городским собратьям покрыли всю внутренность белым веществом. Мы выпустили голубей и почистили внутренность антенны, но получили лишь небольшое уменьшение температуры антенны. В течение этого времени проблема температуры антенны оставалась нерешенной.

Весной 1965 года, закончив измерения потока, мы основательно почистили 20-футовый рупорный рефлектор и положили алюминиевые ленты на склепанные стыки. В результате температура антенны даже несколько повысилась. Мы также разобрали горловину антенны и проверили ее, но обнаружили, что она в порядке. Значит, избыточное излучение, фиксируемое радиотелескопом, не связано с помехами в антенне. Оно приходит из космоса, причем со всех сторон с одинаковой интенсивностью».

Дальше события, приведшие к разгадке проблемы, связаны со случайностями. П. Пензиас во время беседы со своим приятелем

Б. Берке о совершенно других вопросах случайно упомянул о загадочном излучении, принимаемом их антенной. Тот вспомнил, что он слышал о докладе П. Пиблса, работавшего под руководством известного физика Р. Дикке. В этом докладе П. Пиблс якобы упоминал об остаточном излучении ранней Вселенной, которое сегодня должно иметь температуру около 10 градусов Кельвина.

А. Пензиас позвонил Р. Дикке, и обе группы встретились. Р. Дикке и его коллегам П. Пиблсу, П. Роллу и Д. Уилкинсону стало ясно, что А. Пензиас и Р. Вилсон обнаружили реликтовое излучение горячей Вселенной. В это время группа Р. Дикке, работавшая в Принстоне, собиралась сама начать готовить аппаратуру для подобных измерений на длине волны 3 сантиметра, но не успела начать измерения. А. Пензиас и Р. Вилсон уже сделали свое открытие.

О дальнейшем Р. Вилсон говорит: «Мы договорились об одновременной публикации двух писем в «Астрофизическом журнале»: одного из Принстона о теории и другого из лабораторий «Белл» о наших измерениях избытка антенной температуры. В нашем письме Арно и я не должны были касаться любого обсуждения космологической теории происхождения фонового излучения, поскольку мы не участвовали в этой работе. Однако мы считали, что результаты наших измерений не зависят от теории и представляют самостоятельный интерес. Тем не менее нам было приятно, что тайна шума, появляющегося в нашей антенне, среди всех прочих объяснений может быть связана с таким важным космологическим явлением. Однако наше настроение в этот период можно было назвать осторожным оптимизмом».

Эти статьи были опубликованы летом 1965 года.

Первые наблюдения А. Пензиаса и Р. Вилсона показали, что температура реликтового излучения составляет около 3 градусов Кельвина.

В последующие годы многочисленные измерения были проведены на различных длинах волн — от десятков сантиметров до долей миллиметра.

Наблюдения показали, что спектр реликтового излучения соответствует формуле Планка, как это и должно быть для излучения с определенной температурой. Эта температура примерно равна 3 градусам Кельвина.

Так случайно было сделано замечательное открытие нашего века, доказывающее, что Вселенная в начале расширения была горячей. За это открытие А. Пензиасу и Р. Вилсону была присуждена в 1978 году Нобелевская премия по физике.

Почему реликтовое излучение не открыли раньше?

Вернемся теперь к проблеме, относящейся к истории науки, но которой живо интересуются и специалисты — физики и астрофизики. В своей книге «Первые три минуты» известный американский физик С. Вайнберг пишет следующее: «Я хочу попытаться разрешить здесь историческую проблему, которая в равной степени представляется мне загадочной и поразительной. Обнаружение в 1965 году фона космического микроволнового излучения (так иногда называют реликтовое излучение. — И. Н.) было одним из самых важных научный открытий двадцатого века. Почему оно произошло случайно? Или, другими словами, почему не было систематических поисков этого излучения задолго до 1965 года?»

Напомним, что само предсказание существования во Вселенной излучения с температурой несколько градусов было сделано в конце 40-х — начале 50-х годов — за 15 лет до открытия А. Пензиаса и Р. Вилсона.

Может, все дело в том, что тогда не было достаточно чувствительных радиотелескопов, способных его обнаружить? Мы увидим далее, что это, по-видимому, не так. Такого же мнения придерживается и С. Вайнберг. Но дело даже не в этом.

В истории физики много примеров, когда предсказание нового явления делалось задолго до появления технических возможностей его обнаружения. И тем не менее, если предсказание было обоснованным и важным, то физики всегда о нем помнили. Когда появлялись возможности — предсказание проверялось. С. Вайнберг приводит пример предсказания в 30-е годы существования антипротона — античастицы ядра атома водорода. Тогда физики не смели и мечтать о возможности обнаружить его в эксперименте. Но в 50-е годы, когда появились соответствующие возможности, был построен специальный ускоритель в Беркли для проверки этого предсказания.

Однако до середины 60-х годов радиоастрономы даже не знали о реликтовом излучении и о возможности его обнаружения.

Почему так получилось?

С. Вайнберг называет три причины. Первая — это то, что теория горячей Вселенной создавалась Г. Гамовым и его сотрудниками для того, чтобы объяснить распространенность в природе всех химических элементов их синтезом в самом начале расширения Вселенной. Это оказалось неверным, как мы уже говорили в предыдущем разделе, — тяжелые элементы синтезированы в звездах. Только самые легкие элементы ведут свое происхождение с первых мгновений расширения. Были в

первых вариантах теории и другие некорректности. Потом все это было исправлено, но в конце 40-х и в 50-е годы неточности подрывали доверие к теории в целом.

Вторая причина — плохая связь между теоретиками и экспериментаторами. Первые не представляли, может ли реликтовое излучение быть обнаружено с помощью имеющихся наблюдательных средств; вторые не слышали о том, что такое излучение следует искать.

Наконец, третья причина психологическая. Физикам и астрофизикам было очень трудно поверить, что расчеты, относящиеся к первым минутам с начала расширения Вселенной, действительно соответствуют истине. Уж очень велик был контраст между промежутками времени — несколько первых минут и десятки миллиардов лет, отделяющие ту эпоху от нашей.

Еще одну причину, на мой взгляд самую важную, указывает А. Пензиас в своей лекции, прочитанной при вручении Нобелевской премии. Дело в том, что в первых работах Г. Гамова и его сотрудников и в последующих работах, хотя и было сказано о наличии реликтового излучения, но не было указано, что его можно хотя бы в принципе обнаружить. Боле того, Г. Гамов и его коллеги, по-видимому, считали, что это сделать вообще нельзя! Вот что говорит А. Пензиас: «Что же касается обнаружения реликтового излучения, то, по-видимому, они считали, что в первую очередь это излучение проявит себя как увеличение плотности энергии. Этот вклад в приходящий на Землю общий поток энергии должен быть замаскирован космическими лучами и суммарным оптическим излучением звезд. Обе эти составляющие имеют сравнимые плотности энергии. Мнение о том, что действия трех составляющих с приблизительно равными энергиями нельзя разделить, можно найти в письме Г. Гамова, написанном Р. Альферу в 1948 году (не опубликовано: любезно представлено мне Р. Альфером): «Температура космического пространства, равная 5° К, объясняется современным излучением звезд (С-циклы). Единственно, что мы можем сказать, это то, что оставшаяся от исходного тепла Вселенной температура не выше 5° К». Они, по-видимому, не осознавали того, что своеобразные спектральные характеристики реликтового излучения должны выделять его среди других эффектов».

В следующем этапе этой истории довелось участвовать мне самому. Получилось так, что начало моих занятий физической космологией пришлось на первую половину 60-х годов, незадолго до открытия реликтового излучения. Я тогда только что закончил аспирантуру Московского университета под руководством А. Зельманова. Мой учитель интересовался главным образом

механикой движения масс в космологических моделях без упрощающих предположений об их однородном расположении. Его меньше интересовали вопросы конкретной физики процессов в расширяющейся Вселенной. О теории горячей Вселенной я тогда почти ничего не знал.

Незадолго до окончания аспирантуры я заинтересовался следующим вопросом. Мы знаем, как изучают галактики разных типов на разных длинах волн электромагнитного излучения. Если задаться определенными предположениями об эволюции галактик в прошлом и учесть покраснение света от далеких галактик из-за расширения Вселенной, то можно рассчитать, сколько излучения от галактик на каждой длине волны будет сегодня во Вселенной. При этом надо учитывать, что светят не только звезды, многие галактики интенсивно излучают радиоволны метровой и дециметровой длины.

Я принялся за соответствующие расчеты. К тому времени, закончив аспирантуру, я пришел работать в группу академика Я. Зельдовича, где прежде всего интересовались именно физикой процессов во Вселенной.

Все расчеты были выполнены вместе с А. Дорошкевичем. В результате мы получили расчетный спектр излучения от галактик, то есть того излучения, которое должно заполнять сегодняшнюю Вселенную, если учитывать только излучение, родившееся, когда возникли галактики и стали светить звезды. В этом спектре излучения очень интенсивна должна быть область метровых радиоволн (так как радиогалактики сильно излучают такие волны) и область видимого света (звезды дают его очень много), а в области сантиметровых, миллиметровых и еще несколько более коротких электромагнитных волн излучение должно быть пониженным.

Так как в группе, в которой мы работали (а тогда она состояла всего из трех человек — нашего руководителя, А. Дорошкевича и меня), усиленно обсуждались варианты горячей и холодной Вселенной, то в статье, которую мы с А. Дорошкевичем подготовили для печати, мы к излучению галактик добавили гипотетическое излучение, оставшееся от ранней Вселенной, если она в действительности была горячей. Это излучение горячей Вселенной должно иметь длины волн порядка сантиметров и миллиметров и приходилось как раз на ту область длин волн, где излучение от галактик понижено! Поэтому реликтовое излучение (если Вселенная была горячей!) в этой области длин волн должно во многие тысячи и даже миллионы раз превышать излучение известных источников во Вселенной.

Значит, его можно наблюдать! Несмотря на то что общее

количество энергии в реликтовом излучении сравнимо с энергией света от галактик, волны реликтового излучения имеют совсем другую длину волны и поэтому могут быть обнаружены. Вот что говорит в своей нобелевской лекции А. Пензиас о нашей с А. Дорошкевичем работе.

«Первое опубликованное признание реликтового излучения в качестве обнаружимого явления в радиодиапазоне появилось весной 1964 года в краткой статье А. Г. Дорошкевича и И. Д. Новикова, озаглавленной «Средняя плотность излучения в метагалактике и некоторые вопросы релятивистской космологии». Хотя английский перевод появился в том же году, но несколько позже, в широко известном журнале «Советская физика — Доклады», статья по-видимому, не привлекла к себе внимания других специалистов в этой области. В этой замечательной статье не только выведен спектр реликтового излучения как чернотельного радиоволнового явления, но также отчетливо сконцентрировано внимание на двадцатифутовом рупорном рефлекторе лабораторий «Белл» в Кроуфорд Хилл как на наиболее подходящем инструменте для его обнаружения».

Наша статья осталась не замеченной наблюдателями. Ни А. Пензиас и Р. Вилсон, ни Р. Дикке и его сотрудники до опубликования своих статей в 1965 году о ней ничего не знали, о чем А. Пензиас неоднократно с сожалением мне говорил.

Рассказанное еще не исчерпывает недоразумений, связанных с открытием реликтового излучения.

Оказывается, реликтовое излучение могло быть открыто еще в 1941 году. Канадский астроном Э. Мак-Келлар был одним из тех, кто установил существование молекул в межзвездном пространстве. Способ, которым исследовался межзвездный газ, был следующим. Если свет какой-либо звезды на пути к нам проходит сквозь облако межзвездного газа, то атомы и молекулы этого газа вызывают поглощение света звезды на строго определенных длинах волн. Так возникают в спектре линии поглощения межзвездного газа.

Положение линий в спектре зависит от того, какой элемент или какая молекула вызывали поглощение, а также еще от того, в каком состоянии находятся атомы или молекулы.

В 1941 году Э. Мак-Келлар анализировал линии поглощения, вызываемые в спектре звезды 2 Змееносца межзвездными молекулами циана (соединения углерода и азота). Он пришел к выводу, что эти линии (в видимой глазом области спектра) могут возникать только при поглощении света вращающимися молекулами циана. Причем вращение их должно возбуждаться излучением с температурой около 2,3 Кельвина. Ни сам Э. Мак-

Келлар, ни кто другой, конечно, не подумали тогда о возможности того, что вращение молекул вызывается реликтовым излучением. Да и сама теория горячей Вселенной тогда еще не была создана!

Только после открытия реликтового излучения были опубликованы в 1966 году три работы: И. Шкловского, Дж. Филда и Р. Тадеуша, в которых показано, что возбуждение вращения межзвездных молекул циана, наблюдавшееся по спектру звезды в созвездии Змееносца, вызвано реликтовым излучением.

Таким образом, еще в 1941 году было обнаружено хоть и косвенное проявление реликтового излучения — его влияние на состояние вращения в межзвездных молекулах циана.

Но и это еще далеко не конец истории. Вернемся к проблеме технической возможности открытия реликтового излучения. Возникает вопрос: когда техника уже позволяла это сделать? С. Вайнберг пишет: «Трудно ответить точно, но мои коллеги-экспериментаторы говорят мне, что наблюдения могли быть проведены задолго до 1965 года, возможно, в середине 50-х, а может быть, даже и в середине 40-х годов». Так ли это? Осенью 1983 года мне позвонил сотрудник института общей физики Т. Шмаонов, с которым я до этого не был знаком, и сказал, что он хотел бы побеседовать по вопросам открытия реликтового излучения. Мы встретились в тот же день, и Т. Шмаонов рассказал мне, как он в середине 50-х годов под руководством известных советских радиоастрономов С. Хайкина и Н. Кайдановского проводил измерения радиоволн, шедших из космоса, на длине 3,2 сантиметра. Эти измерения проводились с помощью рупорной антенны, подобной той, которая была использована много лет спустя А. Пензиасом и Р. Вилсоном. Т. Шмаонов со всей тщательностью изучил возможные помехи. Конечно, в его распоряжении тогда не было еще столь чувствительных приемников, которые были потом у американских радиоастрономов. Результаты измерений Т. Шмаонова были опубликованы в 1957 году в его кандидатской диссертации и в советском журнале «Приборы и техника эксперимента». Вывод из этих измерений был таков: «Оказалось, что абсолютная величина эффективной температуры радиоизлучения фона... равна 4° ± 3°К». Т. Шмаонов отмечал независимость интенсивности излучения от направления и от времени. Хотя ошибки измерений Т. Шмаонова велики и говорить о какой-либо надежности цифры 4°К не приходится, мы понимаем теперь, что Т. Шмаонов измерял именно реликтовое излучение. К сожалению, ни сам Т. Шмаонов, ни его руководители, ни другие радиоастрономы, которым были известны результаты его

измерений, ничего не знали о возможности существования реликтового излучения и не придали должного значения результатам этих измерений. Их довольно быстро забыли. Когда в 1963 и в 1964 годах после выполнения наших с А. Дорошковичем вычислений мы ходили к многим советским радиоастрономам с вопросом: не известны ли им результаты каких-либо измерений фонового радиоизлучения на сантиметровых или более коротких волнах? — никто из них не вспомнил об измерениях Т. Шмаонова!

Забавно, что даже сам автор измерений не придал им должного значения не только в 50-х, что легко объяснить, но даже после опубликования открытия реликтового излучения в 1965 году А. Пензиасом и Р. Вилсоном. Правда, в то время Т. Шмаонов работал уже совсем в другой области. Только в 1983 году в результате полуслучайных разговоров было обращено внимание на старые измерения, и Т. Шмаонов выступил по этому поводу с докладом на Бюро отделения общей физики и астрономии АН СССР. Это было спустя 27 лет после самих измерений и 18 лет после опубликования результатов А. Пензиаса и Р. Вилсона.

Но даже это еще не все. Когда автор заканчивал эту книгу, он узнал, что были еще измерения японских радиоастрономов в начале 50-х годов, когда якобы также обнаружили фоновое излучение. Эти работы, так же как и работы Т. Шмаонова ни тогда, ни многие годы спустя не обратили на себя внимания и не были практически никому известны.

Вот как причудлива фортуна. И тем не менее вся эта история весьма поучительна. Увидеть какое-либо явление — еще не значит его открыть. Надо осознать значение обнаруженного, надо правильно его объяснить. Конечно, тут играют роль и стечение многих обстоятельств, и просто удача. Но успех никогда не приходит совершенно случайно. Он требует огромного труда, больших знаний, настойчивости и в самой работе, и в доведении ее результатов до сознания других.

Путешествие в далекое прошлое

Реликтовое излучение не возникло в каких-либо источниках, подобно свету звезд или радиоволнам, родившимся в радиогалактиках. Реликтовое излучение существовало с самого начала расширения Вселенной. Оно было в том горячем веществе Вселенной, которое расширялось от сингулярности.

Если подсчитать общую плотность энергии, которая сегодня содержится в реликтовом излучении, то она окажется в 30 раз больше, чем плотность энергии в излучении от звезд,

радиогалактик и других источников, вместе взятых. Можно подсчитать число фотонов реликтового излучения, находящихся в каждом кубическом сантиметре Вселенной. Оказывается, что концентрация этих фотонов 500 штук в $см^3$.

Напомним, что средняя плотность обычного вещества во Вселенной около 10^{-30} $г/см^3$. Это значит, что, если бы мы «размазали» все вещество равномерно в пространстве, то в одном кубическом метре был бы всего один атом водорода — наиболее распространенного элемента Вселенной. В то же время в кубическом метре содержится около миллиарда фотонов реликтового излучения.

Таким образом, кванты электромагнитных волн, эти своеобразные частички, распространены в природе гораздо больше, чем обычное вещество. Реликтовых фотонов в миллиард раз больше, чем тяжелых частиц протонов. Если мы учтем, помимо водорода, и другие химические элементы, в состав ядер которых входят не только протоны, но и нейтроны, то это практически ничего не изменит в нашей оценке, так как водород — главный элемент в природе. Итак, 10^9 реликтовых фотонов на одну тяжелую частицу.

Мы знаем, что сегодня в каждом кубическом сантиметре межгалактического пространства около 500 фотонов, летящих с предельной скоростью во всех направлениях. Каждый фотон имеет свою энергию, соответствующую его частоте. При температуре 3° Кельвина большинство фотонов имеет энергию 10^{-15} эрг каждый. Значит, в каждом кубическом сантиметре имеется энергия реликтового излучения, равная произведению 10^{-15} эрг на 500, то есть $5*10^{-13}$ эрг. Согласно закону Эйнштейна каждой энергии соответствует масса. Энергии $5*10^{-13}$ эрг соответствует масса $5*10^{-34}$ грамма. Таким образом, в каждом кубическом сантиметре в наши дни есть $5*10^{-34}$ грамма реликтового излучения.

Напомним, что обычного вещества на каждый кубический сантиметр приходится в среднем 10^{-30} грамма. Значит, по массе вещества в две тысячи раз больше, чем реликтового излучения. Поэтому, хотя по числу штук фотонов гораздо больше, по общей массе обычное вещество сильно преобладает над реликтовым излучением. Масса реликтового излучения пренебрежимо мала.

Проследим, что было и с теми, и с другими частицами в прошлом.

В обозримом прошлом ни те ни другие частички не рождались и не исчезали. Здесь необходимы некоторые уточнения. Первое из них относится к реликтовым фотонам. Сегодняшняя Вселенная практически прозрачна для реликтового

излучения. Ясно, что реликтовые фотоны в современной Вселенной в подавляющем большинстве не взаимодействуют с веществом и не могут из-за этого меняться в числе. В далеком прошлом, когда плотность вещества была велика, была велика и температура. Вещество Вселенной было ионизовано и являлось почти однородной плазмой. Оно тогда было непрозрачным для излучения. Реликтовые фотоны активно взаимодействовали с веществом. Но сколько фотонов в какой-то малый промежуток времени поглощалось в толще вещества, столько же этим горячим веществом и рождалось! Существовало, как говорят, равновесие между излучением и веществом. Поэтому и в этот период соотношение — миллиард реликтовых фотонов на один протон — оставалось справедливым.

Второе уточнение относится к протонам.

В своем далеком прошлом, в самые первые мгновения после начала расширения, во Вселенной было так горячо, что при температуре больше десяти тысяч миллиардов градусов столкновение частиц рождало протоны и их античастицы — антипротоны, нейтроны и антинейтроны. Ко всему этому мы еще вернемся. Пока мы не обращаемся к экзотическим первым мгновениям, можно считать, что и реликтовые фотоны и тяжелые частицы являются не рождающимися и не исчезающими.

Помня это, отправимся в прошлое. В прошлом плотность числа и тех и других частиц была, конечно, больше, чем сейчас, и возрастали эти плотности при углублении в прошлое в одинаковое количество раз. Значит, остается неизменным их отношение: один протон на миллиард фотонов.

Но между фотонами и тяжелыми частицами есть огромная разница. Масса тяжелых частиц все время неизменна. А энергия фотонов с расширением Вселенной уменьшается из-за красного смещения. Раз меняется энергия, значит, меняется и масса каждого фотона (эта масса целиком связана с энергией его движения). Раньше каждый фотон был энергичнее, а значит, и тяжелее.

В некоторый момент в прошлом суммарная масса миллиарда потяжелевших фотонов, приходящихся на один протон, сравнивается с массой этого протона.

В этот момент в прошлом в каждом кубическом сантиметре масса обычного вещества и масса реликтового излучения сравниваются. Произошло это, когда плотность вещества (и равная ей тогда плотность излучения) была 10^{-20} г/см^3, температура излучения и вещества тогда была около 6 тысяч градусов. Реликтовое излучение было не радиоволнами, а видимым светом. Конечно, в эту эпоху не было отдельных

небесных тел, они возникли существенно позже. А еще раньше?

Еще раньше масса реликтового излучения превосходила массу обычного вещества!

Вот такое было совершенно необычное состояние. Его называют эрой фотонной плазмы.

То, о чем мы будем говорить в последующих строках, покажется кадрами из фантастического фильма. Мы подойдем к моменту начала расширения на ничтожные доли секунды — меньше одной стотысячной доли — и встретимся с совершенно необычными процессами.

На ранних стадиях расширения основную долю массы физической материи во Вселенной составляет свет и, анализируя эту стадию, мы можем на время забыть о ничтожной доли примеси к квантам света частиц обычного вещества, того вещества, которое играет основную роль в наше время, из которого состоят звезды, планеты и мы сами.

Продолжим путешествие в прошлое к сингулярности. Например, через одну секунду после начала расширения температура была десять миллиардов градусов. При меньшем времени температура еще больше. При такой огромной температуре происходят процессы рождения и аннигиляции элементарных частиц. Например, процессы рождения пар электронов и позитронов при столкновении энергичных фотонов и аннигиляции пар электронов и позитронов с превращением в кванты света — фотоны.

Для рождения пары электронов и позитронов надо затратить энергию, равную как минимум сумме масс этих частиц, умноженную на квадрат скорости света (формула $E = mc^2$). Следовательно, такие процессы могут идти лишь при температуре выше десяти миллиардов градусов, когда много квантов света обладает подобными энергиями. Столкновения электронов и позитронов могут вести к рождению нейтрино и антинейтрино, возможна также и обратная реакция — столкновение нейтрино и антинейтрино рождает пару электрон — позитрон. Когда температура еще выше, возможно рождение более тяжелых частиц: протонов и антипротонов, нейтронов и антинейтронов, мезонов и других.

При температурах выше десяти тысяч миллиардов градусов существовало примерно в равных количествах множество сортов частиц (и в равных количествах их античастиц), в том числе и с большой массой. По мере расширения температура падала, и энергии частиц не хватало для рождения нар тяжелых частиц и античастиц, например, таких, как протон и антипротон. Эти частицы «вымирали».

При дальнейшем уменьшении температуры «вымирают» разные виды мезонов.

Очень важное событие происходит при времени около 0,3 секунды после начала расширения. В этот момент присутствуют кванты света, электроны и позитроны, нейтрино и антинейтрино (для простоты мы говорим только об одном сорте нейтрино — об электронных нейтрино).

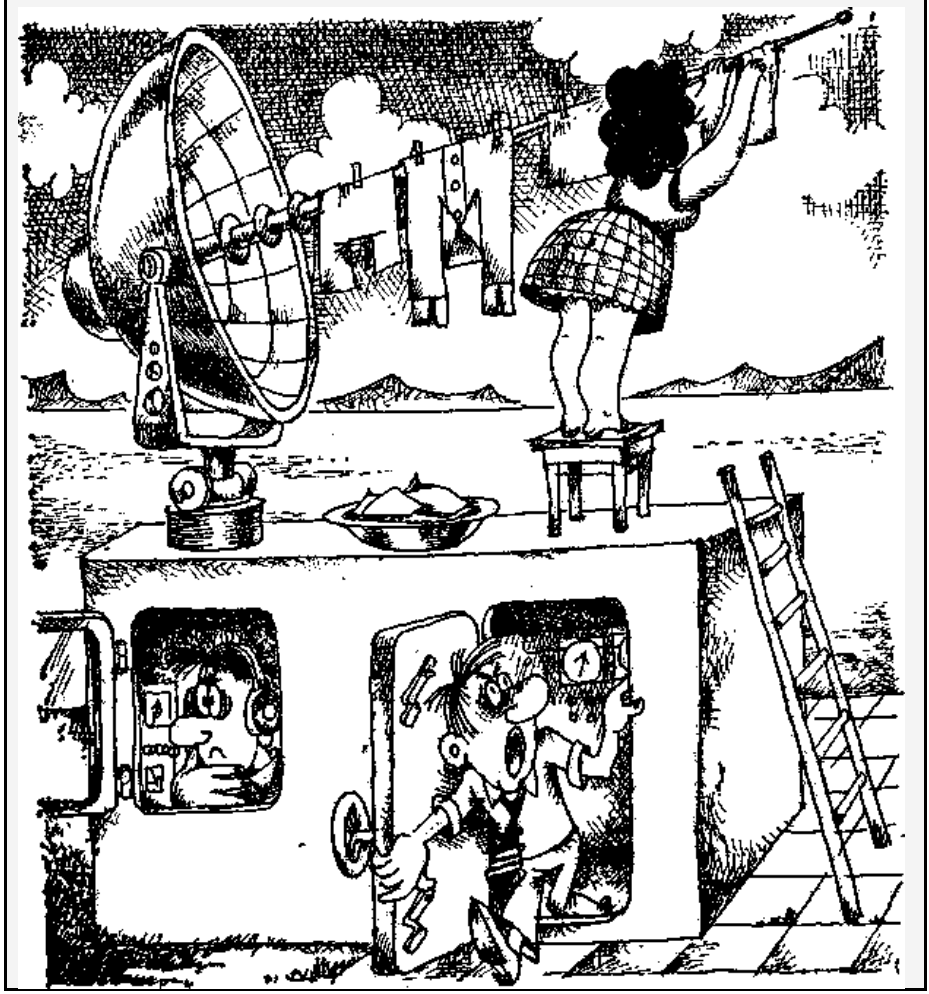
При высокой температуре нейтрино и антинейтрино превращаются в электроны, позитроны и обратно.

Однако нейтрино — частицы, очень слабо взаимодействующие с другими объектами, для них даже плотное вещество прозрачно. И вот при 0,3 секунды после начала расширения все вещество Вселенной, включая и электроны и позитроны, становится прозрачным для нейтрино, они перестают взаимодействовать с остальным веществом. В дальнейшем их число не меняется, и они сохраняются вплоть до наших дней, только их энергия должна упасть из-за красного смещения при расширении точно так же, как температура квантов электромагнитного излучения.

Таким образом, в нашу эпоху во Вселенной, помимо реликтового электромагнитного излучения, должны существовать реликтовые нейтрино и антинейтрино. Энергия этих частиц должна равняться примерно энергии квантов сегодняшнего реликтового электромагнитного излучения, и концентрация их также примерно совпадает с концентрацией реликтовых квантов.

Экспериментальное обнаружение реликтовых нейтрино представляло бы огромный интерес. Ведь для нейтрино Вселенная прозрачна, начиная с долей секунды после начала расширения. Обнаружив реликтовое нейтрино, мы могли бы непосредственно заглянуть в далекое прошлое Вселенной, информацию о которой несут эти частицы.

К сожалению, обнаружение нейтрино столь низких энергий, какими должны быть реликтовые нейтрино, пока практически невыполнимая задача.



В связи с этим напомним, что на наших глазах рождается нейтринная астрономия. Мы стоим на пороге систематического исследования потоков нейтрино, рождающихся при ядерных реакциях вблизи центра Солнца. Эти нейтрино позволяют непосредственно заглянуть в центр Солнца, так как вся масса Солнца для них абсолютно прозрачна.

Нейтринное «просвечивание» Солнца позволит уточнить наши знания о его внутреннем строении. Точно так же в будущем астрофизикам предстоит осуществить нейтринное «просвечивание» нашей Вселенной.

Итак, мы посмотрели, что было во Вселенной с веществом и излучением в первую секунду. Как ни фантастична кажется возможность рассчитывать процессы в первую секунду с начала расширения, но современная физика позволяет это делать с полной надежностью.

Первые пять минут

В известной песенке поется:

Пять минут, пять минут,
Разобраться если строго,
Даже в эти пять минут
Можно сделать очень много...

Первые пять минут в жизни нашей Вселенной... Они определили основные ее особенности, в том числе и те, которые проявились миллиарды лет спустя, в наше время.

Процессы, которые последовали за уже рассмотренными нами первыми мгновениями и которые происходили в эти минуты, полные драматизма и действия грозных ядерных сил, определили существенные черты химического состава сегодняшней Вселенной.

Благодаря этим процессам звезды обладают достаточным запасом ядерной энергии. Поэтому то, что звезды светят, также есть следствие разгула стихий Вселенной в первые пять минут расширения.

Звезды и другие небесные тела возникли из небольшой примеси обычного вещества, о которой мы на время «забыли», рассматривая в предыдущем разделе фотоны и пары частиц — античастиц.

Вернемся теперь к этой небольшой примеси обычного вещества, которое находится в первые доли секунды после начала расширения в «кипящем котле» нейтрино и антинейтрино, электронов и позитронов и световых квантов. Оказывается процессы, в которых участвует обычное вещество, чрезвычайно чувствительны к тем условиям, которые господствовали в первые секунды расширения. Эти процессы обусловили химический состав вещества, из которого много позже, уже в эпоху, близкую к нашей, формировались галактики и звезды. Поэтому химический состав звездного вещества служит чувствительнейшим индикатором физических условий в начале космологического расширения.

Рассмотрим процессы, в которых участвует обычное вещество. В каком состоянии оно находится?

Прежде всего, при температуре свыше 10 миллиардов градусов не может быть нейтральных атомов — все вещество полностью ионизовано и является высокотемпературной плазмой. Более того, при подобной температуре не могут существовать

сложные атомные ядра. Сложное ядро было бы моментально разбито окружающими энергичными частицами. Поэтому тяжелыми частицами вещества оказываются нейтроны и протоны. Эти частицы подвергаются воздействию «кипящего котла» энергичных электронов, позитронов, нейтрино и антинейтрино.

Взаимодействие с этими частицами заставляет нейтроны и протоны быстро превращаться друг в друга. Эти реакции устанавливают равновесие между нейтронами и протонами. Когда температуры достаточно велики, больше ста миллиардов градусов, концентрации нейтронов и протонов будут примерно равны.

В ходе расширения Вселенной с понижением температуры становится все больше протонов и меньше нейтронов. Равенство концентраций нарушается, потому что масса нейтрона больше массы протона и образование протона энергетически более выгодно, а значит, вероятность образования протона больше, чем нейтрона. Если бы реакции продолжались и после нескольких секунд с начала расширения, то через несколько десятков секунд количество нейтронов стало бы ничтожным.

Но скорость реакции резко зависит от температуры. С убыванием ее уменьшается скорость этих реакций, и они почти прекращаются после первых секунд расширения. Относительное содержание нейтронов «застывает» на значении около 15 процентов от, всех тяжелых частиц.

После этого, когда температура падает до миллиарда градусов, становится возможным образование простейших сложных ядер. Теперь энергии квантов и других частиц не хватает для того, чтобы разбивать сложное ядро. Все имеющиеся нейтроны захватываются протонами, давая сначала дейтерий, а потом реакции с участием дейтерия приводят в конце концов к ядрам атома гелия. Образуется также очень небольшое количество изотопа гелия-3, дейтерия и лития. Более сложных ядер в этих условиях практически совсем не образуется. Дело в том, что образование таких элементов в сколько-нибудь значительных количествах может происходить в результате парных столкновений ядер и частиц, уже имеющихся. Это значит, что образование более сложных ядер может начинаться при столкновении ядер гелия-4 с нейтронами, протонами или с теми же ядрами гелия-4. Но эти столкновения не ведут к образованию сложных ядер с относительной атомной массой 5 или 8, потому что таких устойчивых ядер нет!

Указанные причины ведут к тому, что синтез элементов в начале расширения ограничивается только легкими элементами и заканчивается примерно через 300 секунд после начала

расширения, когда температура падает ниже миллиарда градусов и энергия частиц уже недостаточна для ядерных реакций. Реакции, приведшие к образованию гелия, подобны тем, что происходят при взрыве водородной бомбы. Образование элементов тяжелее гелия происходит в звездах уже в нашу эпоху. В звездах вещество находится достаточно долго, и даже не очень быстрые реакции успевают пройти. Синтез элементов тяжелее железа происходит во взрывных процессах (во вспышках сверхновых звезд). Газ, прошедший стадию нуклеосинтеза в звездах, затем частично выбрасывается из них в окружающее пространство при медленном истечении с поверхности звезд и при взрывах. Из этого газа потом формируются звезды последующих поколений и другие небесные тела.

Вернемся к синтезу легких элементов в начале космологического расширения. Так как почти все нейтроны пошли на создание атомов гелия, то нетрудно подсчитать, сколько образуется гелия. Каждый нейтрон входит в состав ядра гелия-4 в паре с протоном, поэтому доля гелия по весу будет равной удвоенной концентрации нейтронов, то есть 30 процентов.

Итак, по истечении примерно пяти минут с начала расширения вещество состоит на 30 процентов из ядер атомов гелия и на 70 процентов из протонов — ядер атома водорода. Такой химический состав вещества остается в дальнейшем неизменным, вплоть до образования галактик и звезд, когда процессы неуклеосинтеза начинают идти в недрах звезд.

Подтверждают ли наблюдения вывод о химическом составе дозвездного вещества?

Сколько гелия в природе?

Гелия очень мало на Земле. Но это связано со специфическими свойствами этого элемента и с теми условиями, в которых формировалась и эволюционировала Земля. Гелий, будучи очень летучим и инертным газом, покинул вещество Земли. Однако астрономы видят его повсюду, хотя он и очень трудно наблюдаем обычными средствами спектрального анализа.

Его обнаруживают в горячих звездах, в больших газовых туманностях, которые окружают молодые горячие звезды, во внешних оболочках Солнца, в космических лучах — потоках частиц большой энергии, приходящих к нам на Землю из космоса. Гелий оказался в самых далеких от нас объектах Вселенной — квазарах.

Весьма примечательно, что где бы его ни обнаруживали, почти всегда его по массе около 30 процентов, а остальные 70

процентов составляет водород. Примесь других химических элементов невелика. Доля их меняется от объекта к объекту, а доля гелия удивительно постоянна.

Вспомним, что именно эти 30 процентов гелия предсказываются в первичном веществе теорией горячей Вселенной. Если большая часть гелия была синтезирована в первые минуты расширения Вселенной, а другие, более тяжелые элементы синтезируются значительно позже в звездах, то именно так и должно быть — гелия везде около 30 процентов, а других элементов по-разному, в зависимости от местных условий их синтеза в звездах и последующего выбрасывания газа из звезд в космическое пространство.

Во время ядерных реакций в звездах гелий тоже синтезируется. Но доля таким образом образовавшегося гелия мала по сравнению с образовавшимся в начале расширения Вселенной.

А нельзя ли все же предположить, что все наблюдаемые 30 процентов гелия образовались тоже в звездах?

Нет, это решительно невозможно. Прежде всего при образовании гелия в звездах выделяется большая энергия, заставляющая звезды интенсивно светить. Если бы такое количество гелия было в прошлом образовано в звездах, излученный ими свет с высокой температурой должен был бы наблюдаться во Вселенной, чего на самом деле нет.

К этому можно добавить, что наблюдения самых старых звезд, которые заведомо формировались из первичного вещества, показывают, что в них гелия тоже 30 процентов. Значит, практически весь гелий Вселенной был синтезирован в самом начале расширения мира.

Так химический анализ вещества сегодняшней Вселенной дает прямое подтверждение правильности нашего понимания процессов, которые протекали в первые секунды и минуты после начала расширения всего вещества.

Триста тысяч лет эры фотонной плазмы и наша эра

В первые 100 секунд расширение в расширяющейся плазме происходил еще один вид процессов. Дело в том, что по прошествии 10 секунд от сингулярного состояния температура во Вселенной упала до нескольких миллиардов градусов. До этого во Вселенной было много электронов и позитронов, рождавшихся при энергичных столкновениях частиц. Теперь энергия столкновения уже недостаточна для их рождения. Электроны и позитроны, сталкиваясь друг с другом, аннигилируют,

превращаясь в фотоны. Вся энергия, которая содержалась в электронах и позитронах, переходит в фотоны реликтового излучения.

Проходят минуты, температура продолжает падать с расширением. Закончилась аннигиляция электронов и позитронов, затухли ядерные реакции в веществе.

Это были последние активные процессы, происходившие в горячей ранней Вселенной. В ней стало слишком холодно (холоднее миллиарда градусов!), и бурные процессы стали невозможны.

Закончился буйный фейерверк жизни молодой Вселенной, и наступил длительный период спокойствия. Он продолжался около 300 тысяч лет.

Напомним, что в этот период расширяющаяся плазма все же очень горяча и полностью ионизована. Она непрозрачна для реликтового излучения, которое по массе превосходит непрозрачную плазму. В этой смеси плазмы и света имеются небольшие колебания, которые можно назвать «фотонным звуком», так как упругой силой, их вызывающей, является давление света.

Вот и все интересное, что было в эту «тихую» эпоху.

Так продолжалось до того времени, когда температура упала примерно до четырех тысяч градусов. Эта температура уже достаточно низка, и ионизованная плазма начинает превращаться в нейтральный газ. Казалось бы, событие это не столь уж важное, но оно явилось поворотным в дальнейшей судьбе Вселенной.

До этого момента ионизованный газ был совершенно непрозрачен для реликтового излучения. После превращения газа (а это в основном водород) в нейтральный, он практически совершенно прозрачен для подавляющей части фотонов реликтового излучения. С этого момента реликтовое излучение отделилось от вещества. Вся Вселенная для него прозрачна. Фотоны распространяются сквозь вещество, которое становилось все более разреженным из-за расширения и все более холодным, практически не поглощаясь.

Ну и почему же это так важно? — может спросить читатель. Дело в том, что только теперь из этого остывшего нейтрального газа могут формироваться небесные тела.

За эрой фотонной плазмы наступает эра формирования структуры Вселенной.

Можно считать, что началом современной эпохи в истории Вселенной был процесс образования отдельных гигантских по размерам комков в первоначальном, почти однородном веществе, комков, из которых впоследствии возникли галактики и их

скопления. Образование комков происходило под действием сил гравитации, и весь процесс получил название «гравитационной неустойчивости».

Еще у И. Ньютона были высказывания о том, что однородное вещество должно собраться в комок или в отдельные комки под влиянием взаимного тяготения частичек. И. Ньютон писал: «Если бы все вещество нашего Солнца и планет и все вещество Вселенной было равномерно рассеяно по всему небу и каждая частица обладала бы врожденным тяготением ко всему остальному и если бы все пространство, по которому было рассеяно это вещество, было бы тем не менее конечным, то все вещество на наружной стороне этого пространства благодаря своему тяготению стремилось бы ко всему веществу, находящемуся внутри пространства, и как следствие упало бы в середину полного пространства и образовало бы там одну большую сферическую массу. Однако если бы вещество было равномерно рассеяно по бесконечному пространству, оно никогда не собралось бы в одну массу; часть его могла бы собраться в одну массу, а часть — в другую, так что образовалось бы бесконечное число больших масс, разбросанных на больших расстояниях друг от друга по всему этому бесконечному пространству. Так могли образоваться Солнце и неподвижные звезды». Значит, однородное вещество стремится под действием тяготения распасться на отдельные комки. Это «стремление» имело место с самого начала расширения однородного вещества Вселенной. Но оно почему-то не распалось! Действительно, если бы такой процесс произошел в самом начале расширения Вселенной, то ничего похожего на галактики и звезды при этом не возникло бы. Ведь вещество было чудовищно плотным. Возникшие в нем комки должны были быть еще плотнее. Такого во Вселенной мы не наблюдаем. Во всяком случае, не наблюдаем в больших количествах. Галактики обладают скромной средней плотностью. Значит, они возникли в эпоху сравнительно близкую к нам, когда расширяющееся вещество Вселенной стало достаточно разреженным. Только тогда проявилась гравитационная неустойчивость. До этого что-то мешало «сработать» этому механизму. Это «что-то» было давлением реликтового излучения.

Давление реликтовых фотонов огромно. Если где-то случайно возникал сгусток плазмы вместе с фотонами реликтового излучения, то силы тяготения, конечно, стремились усилить этот сгусток, в полном соответствии с описанием И. Ньютона. Но этим силам противостояли мощные силы давления фотонов, для которых плазма была непрозрачной. Они распихивали сгусток, и

гравитационная неустойчивость не могла проявиться.

Только после превращения горячей плазмы в нейтральный газ стало возможным проявление гравитационной неустойчивости. Газ теперь прозрачен для реликтового излучения. Возникший комок газа в ходе сжатия силами тяготения не испытывает сопротивления давления фотонов, они свободно выходят из зарождающегося сгустка. Только силы газового давления могут оказывать сопротивление. Но это давление гораздо слабее фотонного, и если сгусток достаточно велик по размеру, то силы газового давления не могут побороть тяготение. Проявляется гравитационная неустойчивость.

Прежде чем познакомиться с тем, как конкретно проявляется гравитационная неустойчивость, нам придется обратиться к еще одной загадке, вставшей на пути исследователей.

Глава IV.
Нейтринная Вселенная

Нейтрино

Нейтрино! Эта частица уже не раз преподносила сюрпризы физикам, и от нее ждали новых. Но того, что случилось в 1980 году, не ожидал никто... Картина, представшая перед мысленным взором ученых, казалась более чем фантастической.

Однако попытаемся изложить все по порядку.

Первым сюрпризом было само изобретение этой частицы швейцарским физиком В. Паули в 1930 году. Именно такое слово — «изобретение» употребляет один из создателей современной нейтринной физики, академик Б. Понтекорво, описывая теоретическое предсказание существования нейтрино.

Вспоминая то время, он пишет: «Трудно найти ситуацию, где бы слово «интуиция» так соответствовало характеру научного достижения, как в случае предсказания нейтрино В. Паули.

Во-первых, 50 лет назад были известны только две «элементарные» частицы — электрон и протон, и даже идея, что для лучшего понимания природы необходимо ввести новую частицу, была сама по себе революционной...

Во-вторых, предлагавшаяся частица, нейтрино, должна была обладать совершенно экзотическими свойствами, и в особенности — огромной проникающей способностью». В. Паули «изобрел» эту удивительную частицу для того, чтобы объяснить, куда девается часть энергии, выделяемая при радиоактивном распаде ядер с испусканием электронов. Такой распад называют бета-распадом.

Дело в том, что когда определяют энергию продуктов бета-распада радиоактивных элементов, например трития в гелий, то измерения показывают, что после распада суммарная энергия всех частиц, которые непосредственно регистрируются приборами, разная в разных актах распада трития. Происходит явное нарушение закона сохранения энергии, часть энергии все время куда-то исчезает.

Даже такие корифеи физики, как, например, Н. Бор, стали говорить, что в этих процессах действительно не сохраняется энергия. И вот тут-то В. Паули совершил свое «изобретение». Он предположил, что никакого нарушения закона сохранения энергии не происходит, а просто в процессе распада, кроме регистрируемых приборами частиц, рождаются частицы еще одного сорта. Эти гипотетические частицы очень слабо

взаимодействуют с обычным веществом и поэтому свободно улетают из лаборатории, не регистрируясь физическими приборами. Улетевшие частицы и уносят с собой недостающую энергию, создавая видимость ее уничтожения. Таинственные частицы получили название нейтрино.

С тех пор прошло более полувека, и, как уже говорилось, нейтрино много раз озадачивало физиков. Так, оказалось, что нейтрино не просто слабо взаимодействует с веществом, как это первоначально предположил В. Паули, а фантастически слабо. Оно совершенно свободно проходит, скажем, сквозь Землю, и не только сквозь Землю, но и сквозь Солнце, звезды, сквозь любые тела Вселенной как сквозь пустоту, как свет сквозь оконное стекло.

Именно поэтому зарегистрировать такие частицы чрезвычайно трудно. Только в 1956 году они были непосредственно обнаружены по ядерным превращениям, ими вызываемым.

Дальнейшие исследования показали, что нейтрино (вместе с его античастицей — антинейтрино. Мы не делаем в нашем рассказе разницы между ними, называя их единым термином нейтрино) бывают, по крайней мере, трех сортов — электронные, мюонные и тау-нейтрино. Каждый сорт участвует только в определенных, специфических для него реакциях.

Не станем перечислять здесь другие удивительные особенности нейтрино. Отметим только, что своеобразие их свойств было настолько загадочным, что, с одной стороны, физики только удивленно разводили руками, не в силах понять глубинные причины этого своеобразия, а с другой стороны, они почти с мистическим благоговением верили (точнее, это подсказывала им научная интуиция), что столь странная частица должна играть особую роль во Вселенной. Вот, что говорили известные физики около двух десятилетий назад.

Д. Уилер, бывший президент Американского физического общества: «В настоящее время нет никакого объяснения тому, почему нейтринные взаимодействия так слабы по сравнению с электромагнитными взаимодействиями и почему они так сильны по сравнению с гравитационными».

Любопытно, что только одна эта фраза выделена Д. Уилером в отдельную главу (!) его работы «Нейтрино, гравитация и геометрия». Для сравнения укажем, что, например, первая глава этой работы содержит более ста страниц со сложнейшими формулами.

Академик М. Марков, внесший большой вклад в развитие нейтринной физики: «Современнику трудно гадать, какое

истинное место займет нейтрино в физике будущего. Но свойства этой частицы столь элементарны и своеобразны, что естественно думать, что природа создала нейтрино с какими-то глубокими, пока для нас не всегда ясными «целями».

Несколько дальше мы увидим, что это за «цели».

Открытия последнего времени, о которых пойдет речь, заставляют с еще большим вниманием отнестись к нейтрино и по-новому оценить сочетание трех великих сущностей — гравитации, нейтрино и Вселенной.

Если гравитация — главная сила, управляющая движением материи во Вселенной, то нейтрино согласно последним данным, по-видимому, главная частица Вселенной. Именно о нем, о нейтрино, нужно думать прежде всего, когда мы пытаемся понять, что есть Вселенная.

Свойства вселенной

Из предыдущих глав читатель уже знает некоторые важнейшие свойства окружающего нас макромира, надежно установленные наукой. Приведем здесь еще раз некоторые из этих бесспорных фактов, необходимых для нашего обсуждения. Прежде всего мы помним, что расширение Вселенной начиналось со сверхплотного состояния и вещество тогда было чрезвычайно горячим. От этой эпохи осталось остывшее реликтовое излучение.

Далее, надежно установлено, что в масштабах миллиардов световых лет нет заметных неоднородностей в распределении плотности вещества в пространстве, нет сверхсверхскоплений галактик. Это значит, что в таких больших маштабах нет отдельных структурных единиц Вселенной. Этот факт особенно надежно установлен по наблюдению реликтового излучения; если бы существовали неоднородности с размерами порядка миллиарда световых лет или более, то с разных направлений на небе реликтовое электромагнитное излучение приходило бы к нам с разной интенсивностью. Дело в том, что повышенная плотность ведет к повышенному полю тяготения. Фотоны реликтового излучения, выходя из этого поля тяготения, тратят дополнительную энергию, то есть «краснеют», и значит, излучение с этих направлений имеет чуть меньшую интенсивность. А такого различия интенсивности реликтового излучения не наблюдается, и, следовательно, иерархическая лестница структуры Вселенной не простирается в бесконечность. То есть в очень больших масштабах, начиная с участков размером примерно в сотни миллионов световых лет, Вселенная однородна.

Напомним еще, что наблюдения выявили характерные

особенности крупнейших структурных единиц Вселенной — сверхскопления галактик. Оказалось, что в таких образованиях галактики и их скопления сосредоточены в тонких слоях, образующих стенки ячеек, внутренность которых практически пуста. Можно сказать, что распределение галактик во Вселенной напоминает пчелиные соты. В ребрах «сот» плотность галактик особенно велика. Итак, некоторые важные факты строения и эволюции Вселенной установлены надежно: это расширение Вселенной, ее первоначальное горячее состояние и нынешняя ячеистая структура.

Нерешенные проблемы

Среди этих проблем непременно придется назвать механизмы возникновения структуры Вселенной.

Как, когда и почему возникла нынешняя структура Вселенной? Почему крупнейшие структурами единицы Вселенной — крупные скопления галактик и сверхскопления — имеют именно такие, а не другие масштабы и форму? Последние пятнадцать лет астрофизики-теоретики в содружестве с наблюдателями пытались ответить на эти вопросы, но до последнего времени нельзя было сказать, что главные этапы процесса образования галактик и их скоплений выяснены.

Дело в том, что нечто очень важное оставалось неизвестным. Подозрение о том, что в наших знаниях о Вселенной есть какой-то существенный пробел, зародилось сравнительно давно, еще тогда, когда в астрофизике возникла так называемая проблема скрытой массы, о которой мы говорили в одной из предыдущих глав.

Напомним, что эта проблема была четко сформулирована в начале 70-х годов и состоит она в следующем. Движение галактик в их скоплениях происходит таким образом, что приходится предполагать наличие в пространстве между галактиками какой-то невидимой массы. Она своим тяготением влияет на движущиеся объекты, но больше никак себя не проявляет. Такая же невидимая масса окружает, вероятно, и большие галактики, о чем можно судить по движению карликовых галактик и других объектов вокруг них. Эта невидимая масса и получила название труднонаблюдаемой, или скрытой, массы, и о природе ее практически ничего не было известно. Наблюдения доказывали, что скрытой массы в областях скопления галактик, должно быть раз в 20 больше, чем видимой массы, сосредоточенной в самих галактиках. Если масса всех галактик в типичном их скоплении составляет около $3*10^{13}$ масс Солнца, то масса невидимой

материи оказывается около 10^{15} масс Солнца. Некоторые специалисты считали, правда, что наблюдения, в которых проявляется тяготение скрытой массы, недостаточно надежны, и споры вокруг этого вопроса то утихали, то разгорались вновь вплоть до самого последнего времени.

Нейтрино во вселенной

Теперь мы возвращаемся к главному герою нашего повествования — к нейтрино, К сказанному в начале главы добавим следующее. До последнего вымени считалось общепринятым, что нейтрино не имеют массы покоя и, подобно фотону, всегда движутся со скоростью света.

Давно и внимательно изучались процессы, в которых участвуют нейтрино и которые могут играть важную роль в астрофизике.

Было, в частности, установлено, что нейтрино в просторах Вселенной очень много, почти столь же много, как и реликтовых электромагнитных квантов — реликтовых фотонов. Как мы видели в предыдущей главе, дело в том, что нейтрино, как и фотоны, должны остаться во Вселенной с того начального периода расширения, когда горячее плотное вещество имело очень высокую температуру и было непрозрачным не только для света, но и для нейтрино. Тогда происходили быстрые реакции превращения друг в друга нейтрино, электронов, электромагнитных квантов и других элементарных частиц. Эти процессы могут быть надежно рассчитаны методами современной физики, и результаты расчетов показывают, что после первых десятков секунд с начала расширения Вселенной фотонов в единице объема было примерно втрое больше, чем нейтрино (вместе с антинейтрино).

Это отношение для реликтовых фотонов и нейтрино остается практически неизменным и во время последующей эволюции Вселенной, вплоть до наших дней. Мы не можем сегодня каким-либо прямым способом регистрировать реликтовые нейтрино, так как уж очень мала их энергия: при нулевой массе покоя нейтрино его энергия составляет около $5*10^{-4}$ электронвольт (эВ). Однако астрофизики могут предсказать, сколько их должно быть. Как уже отмечалось, в каждом кубическом сантиметре содержится около 500 реликтовых фотонов. Реликтовых нейтрино должно быть втрое меньше, то есть около 150 частиц в кубическом сантиметре.

Напомним также, что каждый реликтовый фотон имеет энергию и соответствующую массу 10^{-36} грамма, и, таким образом, плотность массы реликтового электромагнитного

излучения составляет около $5*10^{-34}$ г/см^3. Это примерно в 2000 раз меньше, чем средняя плотность обычного вещества во Вселенной.

Из сказанного можно сделать вывод, что плотность массы реликтового электромагнитного излучения пренебрежимо мала. То же самое можно было бы сказать и о нейтрино: средняя плотность его массы (это, разумеется, не масса покоя, а масса, определяемая энергией частицы) еще меньше, чем плотность электромагнитного излучения, — она составляет около $1,5*10^{-34}$ г/см^3. Таким образом, ролью реликтовых нейтрино в сегодняшней Вселенной можно и вовсе пренебречь — они не только имеют ничтожную суммарную массу, но еще и практически не взаимодействуют с остальным веществом Вселенной. По крайней мере, такое мнение о роли нейтрино в нынешней Вселенной существовало у большинства специалистов до весны 1980 года.

Нейтринный эксперимент

Весной 1980 года группа исследователей из Института теоретической и экспериментальной физики АН СССР, возглавляемая В. Любимовым и Е. Третьяковым, опубликовала результаты многолетних экспериментов, которые указывают на отличие массы покоя электронных нейтрино от нуля. (Напомним, что для краткости мы говорим только об электронных нейтрино. А как упоминалось, существует еще два сорта нейтрино — мюонные и тау-нейтрино.) Вероятное значение массы покоя электронных нейтрино, найденное в этих экспериментах, составляет примерно $6*10^{-32}$ грамма или, в других единицах, 35 эВ. Это, в частности, значит, что электронные нейтрино не обязаны, как считалось раньше, двигаться со скоростью света, они могут двигаться с любой скоростью, меньше световой, а также находиться в состоянии покоя.

Хочется подчеркнуть огромную сложность экспериментов по определению массы покоя нейтрино и тот факт, что сами экспериментаторы не считают массу нейтрино окончательно установленной. Эта величина еще будет проверяться и перепроверяться. Однако если полученный результат подтвердится, то следствия из него будут чрезвычайно серьезными, особенно для астрономии. Скорее всего поэтому теоретики не стали дожидаться окончательных результатов в проверке величины массы нейтрино и активно стали исследовать то, что нужно будет изменить в наших представлениях о Вселенной с учетом у нейтрино массы покоя. Кстати, появляются

сообщения о других экспериментах, говорящих об отличии массы покоя нейтрино от нуля, причем не только для электронных, но и для других сортов нейтрино.

Следует напомнить, что возможные последствия для астрофизики, вытекающие из гипотезы о существовании у нейтрино массы покоя, рассматривались задолго до обсуждаемых экспериментов. Еще в 1966 году советские физики С. Герштейн и Я. Зельдович рассмотрели вопрос о том, как бы сказывалась значительная масса покоя нейтрино на расширении всей Вселенной. Венгерские физики Г. Маркс и О. Шалаи также изучали возможные космологические следствия предположения о ненулевой массе покоя нейтрино.

Но все это были, так сказать, первые прикидки, анализ разных возможностей. Ситуация резко изменилась после прямого эксперимента советских физиков.

Теоретики, вооруженные указанием экспериментаторов, поднялись на настоящий штурм проблемы.

Нейтринная вселенная

Согласно данным, полученным в ИТЭФе, нейтрино в 20 тысяч раз легче электрона и в 40 миллионов раз легче протона. Почему же теоретики считают, что эта легчайшая, ни с чем не взаимодействующая частица должна играть определяющую роль во Вселенной?

Ответ прост: во Вселенной очень много реликтовых нейтрино. В кубическом сантиметре их в среднем почти в миллиард раз больше, чем протонов, и, несмотря на ничтожную массу, в сумме нейтрино оказываются главной составной частью массы материи во Вселенной. Нетрудно подсчитать, что если масса покоя электронных нейтрино равна $6*10^{-32}$ грамма, то только их средняя плотность (не учитывая нейтрино других сортов) составляет примерно 10^{-29} г/см^3, а это примерно в 10—30 раз превышает плотность всего другого «не нейтринного» вещества. И значит, именно тяготение нейтрино должно быть главной действующей силой, определяющей законы расширения Вселенной сегодня. Обычное вещество по массе, а значит, и по гравитационному действию составляет только 3—10 процентов «примеси» к основной массе Вселенной — к массе нейтрино. Можно поэтому смело сказать, что Вселенная состоит в основном из нейтрино, что мы живем в нейтринной Вселенной. Именно этот вывод мы имели в виду, когда в начале главы говорили о фантастической картине, открывшейся перед глазами ученых.

Полученный вывод имеет еще одно интересное следствие.

Важнейшим вопросом, касающимся эволюции Вселенной, является вопрос о том, будет ли вечно продолжаться ее расширение. Ответ, как мы знаем, зависит от того, чему равна средняя плотность материи во Вселенной: если она больше критического значения, то тяготение этой материи через какое-то время затормозит расширение Вселенной и заставит галактики сближаться друг с другом — Вселенная сменит расширение на сжатие; если же плотность меньше критического значения, то тяготение материи недостаточно для того, чтобы остановить расширение, и Вселенная будет расширяться вечно.

Критическая плотность, по современным данным» равна, как говорилось, 10^{-29} г/см^3. Еще недавно считалось, что основную долю плотности во Вселенной составляет обычное вещество, для которого плотность равна примерно $3 \cdot 10^{-31}$ г/см^3. Это означало, что плотность меньше критической и Вселенная должна расширяться вечно. Теперь же есть веские основания считать, что плотность только реликтовых электронных нейтрино примерно равна критической 10^{29} г/см^3. Следует вспомнить, что, помимо реликтовых электронных нейтрино» есть еще мюонные и тау-нейтрино. Об их массе покоя ничего не известно из прямых экспериментов, однако из теории и косвенных экспериментов следует, что если отлична от нуля масса покоя электронных нейтрино, то, вероятно, отлична от нуля и масса покоя других сортов нейтрино. Причем, вероятно, массы покоя других сортов нейтрино не меньше массы покоя электронных нейтрино. Если мы учтем это, то средняя плотность материи во Вселенной окажется больше критической. А это значит, что в далеком будущем, скорее всего через многие миллиарды лет, расширение Вселенной сменится сжатием, и причиной этого «сильнейшего» вывода оказалась «слабейшая» из частиц — нейтрино.

Происхождение галактик

Вернемся к вопросу о происхождении структуры Вселенной. В начале ее расширения вещество представляло собой почти однородную расширяющуюся горячую плазму. Почему же эта однородная плазма на некотором этапе распалась на комки, которые развились в небесные тела и их системы? Как появились зачатки скоплений галактик?

Согласно мнению большинства специалистов подобный процесс происходит из-за гравитационной неустойчивости: маленькие случайные начальные уплотнения вещества своим тяготением стягивают вещество и за счет этого усиливаются - сгущаются и разрастаются. Эти сгустки вещества при определенных условиях могут вырасти в большие комки, дающие начало скоплениям галактик. Основы теории, описывающей этот процесс, были сформулированы еще в 1946 году советским физиком, ныне академиком, Е. Лифшицем.

Теперь мы можем считать, что во Вселенной тяготение нейтрино оказывается важнейшим фактором, и именно это тяготение надо прежде всего учитывать при анализе роста неоднородностей вещества под действием гравитационной неустойчивости.

Общая картина роста неоднородностей представляется следующей. В самые первые мгновения после начала расширения Вселенной были случайные, очень маленькие неоднородности в распределении плотности материи в пространстве. Мы знаем, что спустя всего одну секунду после начала расширения плотность вещества уже недостаточно велика, чтобы препятствовать свободному полету сквозь него нейтрино всех сортов. Нейтрино в этот период имеют еще очень большую энергию и летят со скоростью, очень близкой к скорости света. При этом, естественно, идет выравнивание неоднородностей, создается более равномерное распределение нейтрино. Однако происходит это только в малых пространственных масштабах в районах, сравнительно малых по линейным размерам нейтринных сгущений.

Действительно, из сравнительно мелких сгущений нейтрино успевают вылететь и перемешаться с другими нейтрино достаточно быстро, усредняя, сглаживая все неоднородности. И чем больше проходит времени, тем больше (по линейному размеру) неоднородности нейтрино успевают «рассосаться». Так будет продолжаться до тех пор, пока нейтрино, теряющие энергию вследствие расширения Вселенной, не станут двигаться со скоростью заметно меньшей, чем скорость света. Расчеты показывают, что примерно через 300 лет после начала расширения скорость нейтрино упадет настолько, что они уже не будут успевать вылетать из комков большого размера. И такие комки, плотность в которых сначала лишь немного превышает среднюю, могут усиливаться тяготением, сгущаться и расти, пока среда не распадется на отдельные сжимающиеся облака из нейтрино.

Можно подсчитать, какой будет масса таких нейтринных облаков. Поскольку главным образом только первые 300 лет происходило выравнивание плотности и нейтрино двигались с околосветовой скоростью, мы приходим к выводу, что выравнивание успело произойти в участках с размерами, не превышающими 300 световых лет. В больших масштабах, в нейтринных сгустках большего размера, повышенная плотность нейтрино сохранялась, ибо нейтрино не успело из них вылететь. Затем скорость движения нейтрино резко падала, взаимное их тяготение приводило к увеличению повышенной плотности, и эти сгущения дали начало нейтринным облакам. Следовательно, масса этих облаков определится количеством нейтрино, находившихся в сфере радиусом 300 световых лет через 300 лет после начала расширения Вселенной. Расчет показывает, что типичная масса такого нейтринного облака выражается только

через фундаментальные константы природы: h — постоянную Планка, c — скорость света, G — постоянную тяготения и т — массу покоя нейтрино. Первые три константы известны, и если принять, что масса покоя нейтрино действительно равна 35 эВ = $6*10^{-32}$ грамма, то окажется, что масса типичного нейтринного облака составляет примерно 1015 солнечных масс.

Так обстоит дело с массой нейтринных облаков. А какова будет их форма? Еще 10 лет назад Я. Зельдович показал, что в такого рода процессах возникающие облака должны быть очень сильно сплюснуты, что по форме они должны быть похожи на блины. Соединение множества таких «блинов», хаотично расположившихся в пространстве, даст в совокупности картину гигантских невидимых нейтринных сот.

Итак, к нашему времени в пространстве должна возникнуть ячеистая структура невидимых нейтринных облаков. А что же обычное вещество? В какие пространственные структуры соберется оно?

В начале расширения обычное вещество (это все вещество Вселенной, кроме нейтрино) тоже было распределено в пространстве почти равномерно. Масса этого обычного вещества, как мы знаем (или, точнее, как мы сейчас имеем основание считать), во много раз меньше суммарной массы нейтрино, и в начальной стадии расширения Вселенной это вещество находилось в виде горячей плазмы.

Но, как мы видели в предыдущей главе, по прошествии трехсот тысяч лет после начала расширения обычное вещество настолько охлаждается, что из состояния плазмы превращается в нейтральный газ, давление которого резко падает, — это происходит спустя миллион лет после начала расширения. Затем холодный нейтральный газ начинает сгущаться в поле тяготения возникающих нейтринных облаков, стягиваясь к их центральной части. И именно из этого сгущающегося нейтрального газа постепенно возникают скопления галактик, галактики и звезды. Так как обычного вещества по массе в 30 раз меньше, чем нейтрино, то в невидимом нейтринном «блине» с массой в 10^{15} солнечных масс образуется большое скопление галактик, масса которого в 30 раз меньше, то есть составляет $3*10^{13}$ солнечных масс.

Полученные наблюдательной астрономией данные о массах и форме больших скоплений галактик хорошо согласуются с данными, полученными из подобных теоретических построений.

Реальность и фантастика

Таким образом, огромное море нейтрино, собранных в облака, в которых они движутся со скоростью порядка 1000 километров в секунду, по-видимому, представляет собой то самое «нечто», которое раньше не учитывалось при исследовании Вселенной и без которого невозможно было объяснить многие важные ее черты.

Как говорят астрофизики-теоретики, теперь, после того как появилось основание ввести массу покоя нейтрино, многое непонятное ранее встало на свои места. Хорошо по этому поводу сказал советский астрофизик А. Дорошкевич, перефразируя известный афоризм: «Если бы масса нейтрино оказалась равной нулю, то пришлось бы выдумать какую-либо другую частицу с массой покоя, отличной от нуля, и слабо взаимодействующую с остальными частицами».

Хочется верить, что придумывать новую частицу нам уже не придется, так как полученные советскими физиками данные о массе покоя нейтрино, пусть даже с некоторыми уточнениями, уже в недалеком будущем получат надежное подтверждение.

Все же из осторожности, которая уместна, когда рассуждения касаются всей Вселенной, заметим следующее. Та «запасная» частица, о которой говорил в своем полушутливом замечании А. Дорошкевич, уже есть в арсенале гипотез современной физики. Более того, таких частиц несколько! Назовем здесь для примера фотино — частицу, подобную фотону, но обладающую массой, гравитино — аналогичную гравитону, но также обладающую массой. Так что если прав окажется А. Дорошкевич, то Вселенная устроена еще более диковинным образом и окажется не нейтринной, а либо, скажем, фотинной, либо гравитинной, либо еще какой-нибудь ...инной. Истина здесь еще далеко не установлена, и многое из того, о чем мы рассказываем, является передним краем науки. Поэтому мы и старались отделить твердо установленные факты от еще только решаемых проблем.

Летом 1982 года известный английский физик-теоретик С. Хоукинг собрал в Кембридже узкое международное рабочее совещание для обсуждения процессов, происходивших во Вселенной до истечения первой секунды с начала расширения. Мы об этих процессах будем говорить Дальше. Как-то поздним вечером после напряженной и интересной работы мы прогуливались с академиком М. Марковым по узким улочкам этого старинного и, наверное, самого знаменитого в мире научного центра. Наш разговор невольно обратился к тому, насколько фантастична, многообразна и интересна картина Вселенной, которую мы знаем сегодня. Насколько богаче она той механистической картины движения неделимых шариков, что

представлялась И. Ньютону, творившему в этом городе несколько веков назад.

Я напомнил М. Маркову его пророчество о роли нейтрино во Вселенной (приведенное в начале главы), и сказал, что то, что мы, специалисты, обсуждаем сегодня на наших встречах, гораздо фантастичнее выдумок, встречающихся в научно-фантастической литературе. Академик М. Марков ответил, что научно-фантастической художественной литературы не бывает. Любая художественная литература (настоящая) всегда посвящается людям, их душам. При этом писатель может прибегнуть к фантастическим ситуациям, и тогда это литература фантастическая (хорошая или плохая). Любые потуги на «научность» являются дилетантством, и литература перестает быть литературой, не превращаясь даже в подобие науки. А вот настоящая наука всегда фантастична! И для ее понимания, а тем более для ее развития необходимо незаурядное воображение, оперирующее тем не менее строгими формулами, опирающимися на надежный фундамент знаний. «Трудно и интересно быть ученым», — заметил М. Марков.

Что же касается фантастической литературы, то оказалось, что академик не только является большим ее любителем, но и сам пишет в этом жанре. Когда мы вернулись в Москву, он дал мне почитать свою фантастическую повесть.

Возвращаясь от фантазий к реальности, давайте подведем некоторый итог нашего путешествия к первым секундам расширения Вселенной. Мы оказались свидетелями бурных процессов горячей Вселенной, настоящего фейерверка, приведшего к рождению миров и к современной Вселенной.

Сегодня мы живем во Вселенной с развитой структурой, с системами миров. В звездах идет направленный процесс переработки водорода в гелий и более тяжелые элементы. Запасы ядерного горючего огромны, их хватит на десятки миллиардов лет. А что потом? Звезды не могут быть вечным атрибутом Вселенной, они погаснут. Один из известных космологов, Ж. Леметр, писал: «Эволюцию мира можно сравнить со зрелищем фейерверка, который мы застали в момент, когда он уже кончается: несколько красных угольков, пепел и дым. Стоя на остывшем пепле, мы видим медленно угасающие солнца и пытаемся воскресить исчезнувшее великолепие начала миров».

Означает ли это, что будущее Вселенной должно походить на какое-то пепелище, оставшееся после великого пожара?

Конечно нет! Мы еще обсудим будущее Вселенной. Но прежде чем это сделать, нам придется еще раз приблизиться к сингулярному началу расширения Вселенной. Но этот раз мы подойдем к сингулярности гораздо ближе, и здесь нам не обойтись без крыльев научной фантазии (не фантастики!), той самой фантазии, о которой говорил академик М. Марков.

Глава V.
У границ известного

Почему вселенная такая?

Что происходило во Вселенной вблизи самой сингулярности при температурах гораздо выше 1013 Кельвинов, рассмотренных нами в предыдущих разделах?

Мы уже познакомились раньше с тем общим методом, которым пытаются выяснить, что происходит вблизи самого начала космологического расширения. Для этого находят «следы» тех процессов, которые тогда происходили. Выше говорилось, что ярким «следом» процессов, происходивших в первые секунды после начала расширения, является химический состав дозвездного вещества — наличие 30 процентов гелия, возникшего в ту далекую эпоху. Теперь надо попытаться отыскать по возможности столь же явные «следы» еще более «древних» процессов.

Оказывается, что этими «следами» являются фундаментальные свойства Вселенной. Начнем с перечисления их, а затем посмотрим, следствием каких процессов они являются и как современная наука пытается объяснить возникновение этих загадочных свойств Вселенной. Мы увидим, что объяснение это поистине удивительно.

Первое загадочное свойство — это огромное количество фотонов реликтового излучения по сравнению с числом тяжелых частиц. Вспомним, что отношение этих чисел есть миллиард к единице. Почему такая гигантская разница?

Вторая загадка — почему Вселенная в больших масштабах очень однородна? Однородность, как мы знаем, надежно устанавливается по наблюдениям реликтового излучения, приходящего к нам с разных сторон и имеющего одинаковую интенсивность (не зависящую от направления). Это означает, что в прошлом, в момент, когда плазма превратилась в нейтральный газ и поэтому стала прозрачной и когда вышли реликтовые фотоны, наблюдаемые нами сегодня, точки, далеко разнесенные в пространстве, имели одинаковую температуру. Для той эпохи каждая такая точка лежала тогда вне горизонта видимости, очерченного вокруг другой точки. Поэтому точки были причинно не связаны, не могли за время расширения Вселенной обменяться сигналами. Как же в таком случае у них получились одинаковые температуры, если одна точка не может даже знать, какая

температура у другой? Эта проблема получила название «проблемы горизонта».

Третья загадка — почему сегодня, спустя 10—20 миллиардов лет после начала расширения, плотность материи во Вселенной достаточно близка к критическому значению, а геометрические свойства пространства близки к свойствам плоского пространства? Ведь если в какой-то момент есть отличие плотности вещества от критического значения, то с течением времени отличие это увеличивается. Действительно, равенство плотности критическому значению означает точный баланс скорости расширения и сил тяготения. Если же этот баланс хоть немного нарушен, скажем, в пользу тяготения, то торможение расширения все сильнее будет нарушать баланс с течением времени. Поэтому, если сегодня плотность материи отличается от критической не более чем в несколько раз, то в прошлом тяготение и скорость должны были быть сбалансированы с ювелирной точностью. Можно подсчитать, что спустя секунду после начала расширения баланс мог нарушаться не более чем на одну десятитысячную миллиардной доли процента! Откуда взялась эта ювелирная балансировка?

Наконец, еще одна загадка — почему, несмотря на удивительную однородность Вселенной в очень больших масштабах, в меньших масштабах все же были в прошлом отклонения от однородности, небольшие первичные флуктуации, давшие затем начало галактикам и их системам? Это проблема возникновения первичных флуктуации, и не каких-либо, а таких, которые в эпоху, близкую к нашей, привели к возникновению отдельных миров.

Ключ к решению этих проблем дали успехи физики элементарных частиц.

Проследим, как этим ключом отпираются запоры, охраняющие сокровенные тайны.

Известны четыре вида физических взаимодействий: сильные (или ядерные), электромагнитные, слабые (обусловливающие, например, радиоактивный распад) и гравитационные. Согласно современным представлениям эти виды взаимодействий проявляются как разные только при сравнительно малых энергиях, а при больших — объединяются в единое взаимодействие. Так, при энергиях порядка 10^2 гигаэлектронвольт (ГэВ), что соответствует температуре 10^{15} Кельвинов, объединяются электромагнитные и слабые взаимодействия. При энергиях около 10^{14} ГэВ или температуре 10^{27} Кельвинов происходит так называемое «великое объединение», когда сливаются сильные, слабые и

электромагнитные взаимодействия. Наконец, при энергиях около 10^{19} ГэВ или температуре 10^{32} Кельвинов, вероятно, к ним присоединяется и гравитационное взаимодействие («суперобъединение»).

Оставим пока в стороне возможность последнего объединения всех сил и гравитации и рассмотрим, к каким следствиям для космологии ведет теория «великого объединения».

Начнем с первой из перечисленных выше проблем. Читатель, возможно, был несколько удивлен, почему первая проблема считается загадкой. Что тут необыкновенного, если на миллиард реликтовых фотонов приходится одна тяжелая частица?

Необычность этого станет очевидной, если мы отправимся в прошлое к температурам 10^{13} Кельвинов, когда, как мы знаем, все время рождалось и аннигилировало огромное количество пар частиц и античастиц. Среди них были и электроны и позитроны, были протоны и антипротоны, нейтроны и антинейтроны. Причем рожденных таким образом частиц, каждого сорта было примерно столько, сколько реликтовых фотонов. «Кипящий котел», который мы рассматривали, содержал примерно одинаковое число частиц всех сортов и их античастиц.

Если бы число тяжелых частиц и античастиц (их называют барионами) было в точности одинаково для каждого сорта, то в ходе расширения они бы все проаннигилировали, превратившись в реликтовые фотоны и нейтрино, и во Вселенной, кроме реликтового излучения и нейтрино, вообще бы ничего не осталось! Не осталось бы вещества, из которого потом формировались звезды и планеты и мы с вами.

Но почему-то число частиц и античастиц было не в точности одинаково, но и не сильно отличалось друг от друга. На каждые миллиард пар частиц-античастиц приходилась одна «лишняя» тяжелая частица! Миллиард пар с понижением температуры проаннигилировали, а эта «лишняя» частица осталась. Из таких оставшихся частиц и возник весь окружающий нас сегодня мир — мир звезд, планет, газа.

Опять мы видим какую-то странную ситуацию: миллиард пар и одна лишняя частица. Откуда она взялась и почему одна на миллиард?

В этом и состоит проблема. До недавнего времени считалось, что если «лишней» частицы не было с самого начала, то она и не может возникнуть ни в каких реакциях. Считалось, что неизменным остается «барионный заряд» — так называют разность числа тяжелых частиц и античастиц. Теория «великого объединения» показала, что это не так, есть реакции, которые

нарушают закон сохранения барионного заряда. Но в этих реакциях участвуют сверхтяжелые частицы. Это так называемые сверхтяжелые хиггсовские и калибровочные частицы. Такие сверхтяжелые частицы могут рождаться только при очень больших энергиях, поэтому и реакции с изменением барионного числа могут успешно идти только при очень больших энергиях. Для простоты изложения, чтобы показать главную идею, мы будем говорить об одной сверхтяжелой частице — сверхтяжелом Х-бозоне. Масса этой частицы в энергетических единицах равна энергии «великого объединения» — 10^{14} ГэВ (в 10^{14} раз тяжелее протона), то есть Х-бозоны могут эффективно рождаться при столь больших энергиях, соответствующих температуре 10^{27} Кельвинов. Такие температуры были во Вселенной при 10^{-34} секунды после начала расширения. В это время (и при еще более высоких температурах) реакции с изменением барионного числа были столь же интенсивны, как и другие реакции.

Следующим важным обстоятельством является отсутствие симметрии между частицами и античастицами. Это означает, что темпы реакций с частицами и соответствующих реакций с античастицами, вообще говоря, несколько различны.

Теперь мы можем объяснить возникновение в ходе расширения горячей Вселенной одной «лишней» частицы на миллиард пар частиц-античастиц.

При температурах выше 10^{27} Кельвинов во Вселенной была сверхгорячая смесь всех фундаментальных частиц и точно такого же количества их античастиц, находящихся в термодинамическом равновесии. Никакого избытка «лишних» частиц не было. Если бы не было различия между свойствами частиц, и античастиц и не было реакций с несохранением барионного числа, то при расширении Вселенной и падении температуры все пары тяжелых частиц и их античастиц проаннигилировали бы (ведь их одинаковое число!) и во Вселенной не осталось бы к нашему времени ни нейтронов, ни протонов — все превратилось бы в легкие частицы. Не было бы в сегодняшней Вселенной обычного вещества.

Но в действительности происходит следующее. Когда температура падает ниже 10^{27} Кельвинов, темп всех процессов с Х-бозонами и их античастицами анти-Х оказывается медленнее, чем темп расширения Вселенной. Эти частицы не успевают аннигилировать или распадаться, и их концентрация оказывается «замороженной». Только позже, когда пройдет достаточно времени, они будут распадаться. Этот процесс и является теперь ключевым для дальнейшего.

Х-бозон, как и его античастица анти-Х, могут распадаться с

нарушением барионного заряда, причем Х-частица и Х-античастица распадаются не совсем одинаково. В результате, как показывает расчет, и возникает маленький избыток частиц над античастицами. Расчеты эти еще не очень точны, но они показывают, что число возникающих лишних частиц, вероятно, близко к одной на миллиард пар частиц-античастиц. Частицы и античастицы проаннигилируют в ходе расширения Вселенной, превратясь в конце концов в фотоны, которые вместе с имевшимися там фотонами и составят реликтовое излучение (напомним, что во Вселенной остаются также нейтрино), а избыток барионов останется. Вот он-то и является обычным веществом сегодняшней Вселенной. Ясно, что число фотонов по сравнению с «лишними» частицами будет приблизительно в миллиард раз больше.

Так решается первая проблема.

Обратимся теперь к трем другим. Согласно теории «великого объединения», во Вселенной при температуре порядка 10^{27} кельвинов и больше было поле (его называют скалярным полем), которое обладало свойствами вакуума, рассмотренными нами в разделе «Гравитация пустоты». В частности, у этого ноля было огромное «отрицательное давление» — натяжение, равное плотности энергии самого ноля. Такое поле получило название «ложного вакуума». Отличие его от истинного вакуума, помимо всего прочего, в том, что соответствующая плотность «ложного вакуума» фантастически огромна — около 10^{74} г/см3. Мы знаем, что плотности вакуума соответствует космологическая постоянная в уравнениях тяготения Эйнштейна. В ту эпоху такая постоянная (ее можно назвать вслед за «ложным вакуумом» — «ложной постоянной») также была огромна.

В начале расширения, при временах меньше 10^{-34} секунды, Температура во Вселенной была выше 10^{27} келъвинов. Плотность «ложного вакуума» была 10^{74} г/см3, но плотность горячих реальных частиц и античастиц обычной материи была еще выше. Поэтому тогда никак не проявлялись гравитационные свойства «ложного вакуума» и расширение Вселенной проходило по обычным законам. В ходе расширения плотность обычной материи уменьшалась и при 10^{-34} секунды после начала расширения сравнялась с плотностью «ложного вакуума». Мы уже видели в разделе «Гравитация пустоты», насколько необычны гравитационные проявления вакуума. Его гравитация вместо притяжения вызывает отталкивание. Так случилось и в «эпоху» 10^{-34} секунды. Гравитационное отталкивание вакуума заставляет мир расширяться ускоренно. Плотность «ложного вакуума» постоянна, она не уменьшается со временем, поэтому ускорение

расширения тоже постоянно. Скорость расширения (скорость удаления друг от друга двух произвольных элементов среды) непрерывно нарастает вместо затухания с течением времени, как это имеет место без гравитации вакуума под действием тяготения обычной материи), и очень быстро все размеры во Вселенной невероятно растягиваются и становятся огромными. Эта стадия ускоренного расширения получила название «раздувающейся» Вселенной. За период с 10^{-34} секунды по 10^{-32} секунды с начала расширения все размеры во Вселенной увеличились в 10^{50} раз?

Но состояние «раздувающейся» Вселенной неустойчиво. Температура и плотность обычной материи стремительно уменьшаются при таком расширении. Вселенная становится переохлажденной. Плотность обычной материи становится совершенно пренебрежимой по сравнению с плотностью «ложного вакуума». В это время становится возможным фазовый переход из состояния «ложного вакуума» с огромной плотностью, в конце концов, в состояние, когда вся плотность массы (и соответствующая плотность энергии) «ложного вакуума» переходит в плотность массы обычной горячей материи, а плотность истинного вакуума равна нулю или очень мала. Это означает, это из энергии, заключенной прежде в «ложном вакууме», возникает огромное количество частиц и античастиц обычной материи, обладающих большой энергией. Вселенная вновь разогревается до температуры около 10^{27} Кельвинов.

Деталей этого перехода мы здесь касаться не будем. Отметим только, что разогрев Вселенной происходит спустя, вероятно, 10^{-32} секунды после начала расширения. За короткое время, с 10^{-34} секунды по 10^{-32} секунды, Вселенная невероятно ускоренно «раздувается» из-за гравитационного отталкивания «ложного вакуума». Так, если без стадии «раздувающейся» Вселенной эти расстояния до Вселенной увеличились бы всего в 10 раз, то при наличии такой стадии продолжительностью с 10^{-34} секунды по 10^{-32} секунды мир за то же время расширится в 1050 раз! После этого начинается расширение согласно законам теории горячей Вселенной, с которой мы уже знакомы.

Процессы синтеза гелия и другие процессы, описанные нами, протекают много времени спустя после стадии «раздувающейся» Вселенной (сравните: 1 секунда — 300 секунд для синтеза гелия и 10^{-34}—10^{-32} секунды для стадии «раздувающейся» Вселенной!) так, как описано в соответствующих разделах.

Стадия «раздувающейся» Вселенной сразу решает вторую проблему из перечисленных в начале этого раздела — проблему горизонта. Действительно, возьмем точки, которые вначале, до стадии «раздувания», лежат очень близко друг к другу внутри

общего горизонта видимости для того момента. Между ними возможен обмен сигналами, выравнивание температуры и другие процессы. Затем, в результате стремительного растяжения в ходе «раздувания» точки оказываются разнесенными на гигантские расстояния. В нашу эпоху они лежат на огромных расстояниях, заметно превышающих расстояния до горизонта, если не учитывать стадии «раздувающейся» Вселенной. Поэтому после «раздувания» эти точки действительно не смогут обменяться сигналами, но до «раздувания» это было возможно. Переход плотности «ложного вакуума» в плотность обычной материи в конце стадии «раздувающейся» Вселенной решает третью проблему. «Антигравитация» «ложного вакуума» заставляет возникающую из него обычную материю расширяться точно со «сбалансированной» скоростью. Можно сказать, что плотность вакуума в точности соответствует критической плотности для той эпохи и после фазового перехода плотность материи, естественно, тоже будет равна критической с огромной точностью.

Обратимся теперь к четвертой проблеме — к проблеме возникновения небольших первичных флуктуации плотности, которые должны были существовать в среде сразу после окончания стадии «раздувающейся» Вселенной. Такие неоднородности должны возникнуть в результате рассматриваемых процессов уже в силу квантовой природы материи. Действительно, распад «ложного вакуума» в обычную материю можно сравнить с процессом квантового распада радиоактивного вещества. В таких процессах всегда возникают небольшие неоднородности. Так, при радиоактивном распаде вещества одни его части распадаются чуть раньше, другие чуть позже. Подобно этому квантовый распад «ложного вакуума» в одних местах произошел чуть раньше, в других чуть позже, и это привело к тому, что переход к расширению при действии тяготения образовавшейся горячей материи происходил в разных местах в несколько различные моменты времени, что и повлекло за собой возникновение небольших неоднородностей плотности. Это есть не что иное, как первичные звуковые колебания, которые потом, после длительной эволюции, и привели к возникновению галактик.

Так, теория «раздувающейся» Вселенной объясняет основные особенности окружающего нас мира.

Но эта теория дает целый ряд других интереснейших предсказаний.

Мы уже говорили, что исчезновение состояния «ложного» вакуума можно сравнить с фазовым переходом. Явление фазового перехода нам знакомо, например, по процессу отвердения

жидкости, превращения ее в твердое, кристаллическое состояние. При кристаллизации жидкости возможно возникновение в разных местах кристалликов с разной ориентацией осей кристаллической решетки. В результате в затвердевшей жидкости возни кают разные области — домены, соприкасающиеся друг с другом.

Согласно новейшим результатам анализа процессов в ранней Вселенной, в ходе фазового перехода в «раздувающейся» Вселенной возникают тоже соприкасающиеся домены с разными свойствами. На границах доменов возникают всякие экзотические частицы и образования. Например, там могут появляться так называемые магнитные монополи. Это частицы, несущие изолированный магнитный заряд, подобно тому, как электроны или протоны несут изолированный электрический заряд. Только магнитный монополь должен быть сверхтяжелым, в 10^{16}— 10^{17} раз тяжелее протона! Такие частицы не могут создаваться в современной Вселенной, для их образования не хватает энергии. Магнитные монополи экспериментально пока не открыты. Но на границах доменов в «раздувающейся» Вселенной их должно быть много. Давайте проследим, что будет с возникшим доменом в ходе дальнейшей эволюции Вселенной.

Домены рождаются в «эпоху 10^{-34} секунды» после начала расширения. И размер каждого домена около 10^{-34} световой секунды, или около 10^{-24} сантиметра. Затем, в эпоху «раздувания» Вселенной, его размер увеличивается в 10^{50} раз, то есть до 10^{26} сантиметров (напомним, что это уже 10 миллионов световых лет!).

Стадия «раздувающейся» Вселенной заканчивается к 10^{-32} секунды. После этого Вселенная расширяется по более привычным законам, тормозясь обычным тяготением. Размеры в ней к нашему времени увеличиваются еще примерно в 10^{25} раз. Значит, размер домена будет примерно 10^{51} сантиметров. Это колоссальное число — около 10^{33} световых лет. Напомню, что размер наблюдаемой области Вселенной «всею» около 10^{10} световых лет! Никакой сигнал, выпущенный во Вселенной после стадия «раздувания», не успевает пройти больше 10^{10} световых лет. Это горизонт видимости, о котором мы говорили.

Следовательно, если домены как следствие фазовых переходов в далеком прошлом Вселенной существуют, то они огромны. Мы живем в одном из таких доменов, где-то внутри его. Стенки, отделяющие «наш» домен от других, лежат от нас, вероятно, на расстоянии около 10^{33} световых лет! Внутри домена распределение вещества в больших (по нашим меркам) масштабах однородно. На стенках множество монополей и другой

«экзотики». А за стенкой — другой мир. Не правда ли, мы пришли к интереснейшей и удивительной картине?

Наша однородная Вселенная в невероятно больших масштабах далеко за горизонтом видимости снова оказывается неоднородной! Та Вселенная, о которой мы говорили, есть «только» наш домен.

Как не обратиться здесь к опыту истории астрономии. Все системы мира, созданные в разные эпохи, претендовали на описание всего мира, всей Вселенной, но на деле оказывались моделью конкретных астрономических систем. Система мира Аристотеля и Птолемея правильно отображала особенности Земли как небесного тела — ее шарообразность, движение Луны вокруг Земли. Все остальное в системе оказалось ошибочным. Система мира Коперника была моделью Солнечной системы. Вселенная Гершеля — модель нашей Галактики. Теперь, вполне возможно, свойства мира скоплений галактик также описывают «только» наш домен.

Поистине неисчерпаемы свойства окружающей нас материи, и столь же неисчерпаемо могущество человеческого ума, познающего ее свойства.

Все вопросы этого раздела мы обсуждали на рабочем совещании в Кембридже, о котором говорилось выше. Из осторожности надо еще раз подчеркнуть, что рассказанное — самый передний край, на котором ведет бой современная наука. Многое еще может уточняться, многое неизвестно.

Так, неизвестно, что было еще ближе к сингулярности. Ясно только, что при временах меньше чем 10^{-45} секунды после сингулярности распадалось на кванты время и пространство. Но что, как и почему происходило — об этом пока только догадки.

А что было до начала расширения? Об этом достоверно ничего не известно. Можно было бы привести кое-какие догадки. Но это пока еще не наука. И летать на крыльях фантазии без твердого управления наукой в книге, конечно, можно, но это уже в книге совсем иного рода, чем данная.

На крыльях времени

В научном творчестве каждого физика, в особенности физика-теоретика, время от времени наступают периоды, когда кажется, что в твоей области нет больше интересных задач. Про нашего физика-теоретика Л. Ландау рассказывают, как он в молодости жаловался, что подобно хорошим девушкам, которые все уже заняты или вышли замуж, все хорошие, стоящие задачи уже решены и вряд ли можно найти что-нибудь достойное среди

оставшихся. Он, конечно, сам опроверг свое шутливое замечание; им поставлено и решено много замечательных задач. Подобно тому как на смену вышедшим замуж симпатичным девушкам приходят в этот мир другие, еще более симпатичные, так и на смену решенным проблемам встают новые, еще более увлекательные.

Вспоминается такая полоса в моей жизни: мне казалось тогда, что я занимаюсь неперспективными проблемами. Я как-то поделился об этом с одной из коллег. Разговор перекинулся на будущее отдельных небесных тел. И она предложила интересную задачу о расчете остывания нейтронных звезд в экзотических условиях очень отдаленного будущего Вселенной. Эта совместно выполненная нами работа, совместный анализ работ других ученых об отдаленном будущем и составляет основу нашего дальнейшего рассказа.

Мы изучаем прошлое, чтобы лучше понять настоящее и будущее, а близкое и отдаленное будущее человечества, будущее разума во многом зависит от будущего природы, от судеб Земли, Солнца Галактики, Вселенной.

Изучение будущего Вселенной принципиально отличается от изучения прошлого. Прошлое оставило свои следы, и, обнаруживая их, мы проверяем правильность своих представлений. Картина будущего — это всего экстраполяция, прямая проверка здесь невозможна. И тем не менее сегодня фундамент физических и астрофизических знаний настолько прочен, что позволяет с достаточной уверенностью рассматривать отдаленное будущее Вселенной.

Оно зависит прежде всего от того, будет ли она вечно расширяться. Рассмотрим сначала будущее неограниченно расширяющейся однородной Вселенной с плотностью, не превышающей критического значения. Какие же процессы произойдут в этой неограниченно расширяющейся Вселенной?

Первый из таких процессов сейчас ни у кого не вызывает сомнений — звезды в будущем погаснут. Солнце закончит свою активную эволюцию через несколько миллиардов лет и превратится в белый карлик размером с Землю, который будет постепенно остывать. Звезды массивнее Солнца проживут еще меньше и в зависимости от массы в конце концов превратятся либо в нейтронные звезды с поперечником всего в десятки километров, либо в черные дыры.

Наконец, возможен катастрофический взрыв в конце жизненного пути звезды с полным её разрушением. Так, по-видимому, взрываются некоторые звезды, называемые сверхновыми.

Звезды менее массивные, чем Солнце, живут дольше, но и они рано или поздно превращаются в остывшие карлики.

В наше время возникают и новые звезды из межзвездной среды. Однако настанет время, когда необходимые запасы ядерной энергии и вещества будут исчерпаны, новые звезды рождаться не будут, а старые превратятся в холодные тела или черные дыры.

Звездная эра эволюции Вселенной закончится примерно через 1014 лет. Этот срок огромен, он в 10 тысяч раз больше времени, прошедшего от начала расширения Вселенной до наших дней.

А теперь о судьбе галактик.

Звездные системы — галактики — состоят из сотен миллиардов звезд. В центрах галактик, вероятно, находятся сверхмассивные черные дыры, о чем свидетельствуют бурные процессы в галактических ядрах, наблюдаемые астрофизиками. Для будущего галактик существенны очень редкие в наше время события, когда какая-либо звезда в результате гравитационного взаимодействия с другими звездами приобретает большую скорость, покидает галактику и превращается в межгалактического странника. Звезды постепенно будут покидать галактику, а ее центральная часть будет понемногу сжиматься, превращаясь в очень компактное звездное скопление. В таком скоплении звезды будут сталкиваться друг с другом, превращаясь в газ, и этот газ в основном будет падать в центральную сверхмассивную дыру, увеличивая ее массу. Звезды также будут разрушаться приливными силами, пролетая слишком близко от этой черной дыры.

Конечный этап — это сверхмассивная черная дыра, поглотившая остатки звезд центральной части галактики, и рассеивание около 90 процентов всех звезд внешних частей в пространстве. Процесс разрушения галактик закончится примерно через 10^{19} лет, все звезды к этому времени давно погаснут и потеряют право именоваться, звездами. Для дальнейших процессов определяющей является предсказываемая современной физикой нестабильность ядерного вещества. Имеется в виду, что протон хотя и очень долго живущая, но все же нестабильная частица. Теория «великого объединения», которая предсказывает бурные процессы в эпоху с 10^{-34} секунды по 10^{-32} секунды после начала расширения Вселенной, предсказывает и необходимость распада протона (а также и нейтрона в составе сложных ядер, который в этих условиях также считался стабильным). Среднее время его жизни оценивается примерно в 10^{32} лет. Конечный продукт распада протона — один позитрон, излучение в виде фотона, нейтрино и, возможно, одна

или несколько электронно-позитронных пар. Хотя распад протона еще не наблюдался непосредственно, мало кто из физиков сомневается в неизбежности такого процесса.

Итак, примерно через 10^{32} лет ядерное вещество полностью распадется. Из мира исчезнут даже погасшие звезды. Но распад ядерного вещества уже задолго до этого срока начнет играть важную роль в эволюции Вселенной. Позитроны, возникающие при распаде нуклонов (это общее название протонов и нейтронов), аннигилируют с электронами, превращаясь в фотоны, которые вместе с фотонами, прямо возникающими при распаде нуклона, нагревают вещество. Только нейтрино свободно покидают звезду и уносят около 30 процентов всей энергии распада.

Процесс распада будет поддерживать температуру умерших звезд и планет на уровне хоть и низком, но все же заметно отличном от абсолютного нуля. Так, белые карлики, остыв за 10^{17} лет до температуры 5 Кельвинов, будут потом сохранять эту температуру из-за выделения энергии при распаде вещества внутри их. Нейтронные звезды остывают за 10^{19} лет до температуры около 100 Кельвинов, после чего распад вещества в них будет поддерживать эту температуру.

Спустя 10^{32} лет все ядерное вещество полностью распадется, звезды и планеты превратятся в фотоны и нейтрино.

Несколько иная судьба у рассеянного в пространстве газа, который останется после разрушения галактик (по массе он может составить около одного процента всего вещества Вселенной). Ядерное вещество этого газа тоже, разумеется, распадется через 10^{32} лет. Однако в этом случае позитроны, возникающие при распаде, уже не будут аннигилировать с электронами — из-за крайней разреженности газа вероятность встречи этих частиц чрезвычайно мала, и в результате образуется разреженная электронно-позитронная плазма.

К этому времени, то есть через 10^{32} лет, во Вселенной останутся еще черные дыры, возникшие из массивных звезд после их угасания, и сверхмассивные черные дыры, образовавшиеся в центрах галактик (об их судьбе мы скажем немного позже).

Что же будет происходить во Вселенной после распада ядерного вещества?

В ту далекую эпоху во Вселенной будут присутствовать фотоны, нейтрино, электронно-позитронная плазма и черные дыры. Основная часть массы окажется сосредоточенной в фотонах и нейтрино. Ибо именно в эти виды материи превратится обычное вещество после распада. Начнется эра излучения. Правда, надо помнить, что это излучение, чрезвычайно сильно остывшее.

С расширением Вселенной плотность массы излучения быстро будет падать, так как уменьшается и плотность числа частиц, и энергия каждого кванта (а значит, и его масса). В отличие от излучения средняя плотность обычной материи в виде электронно-позитронной плазмы и черных дыр убывает только из-за уменьшения их концентрации при расширении Вселенной. Значит, плотность этих видов материи убывает медленнее, чем плотность излучения. Поэтому ко времени 1033 лет плотность материи уже будет определяться главным образом массой, заключенной в черных дырах. Ее будет гораздо больше, чем в электронно-позитронной плазме. Если масса покоя нейтрино не ноль, как мы это разбирали выше, то значительная доля массы останется также в нейтрино. На смену эре излучения придет эра черных дыр!

Но и черные дыры не вечны. В поле тяготения вблизи черной дыры происходит, как мы знаем, рождение частиц; причем у черных дыр с массой порядка звездной и больше возникают кванты излучения. Такой процесс ведет к уменьшению массы черной дыры, она постепенно превращается в фотоны, нейтрино, гравитоны. Но процесс этот чрезвычайно медленный. Скажем, черная дыра с массой в 10 масс Солнца испарится за 10^{69} лет, а сверхмассивная черная дыра, масса которой еще в миллиард раз больше, — за 10^{96} лет. И все же постепенно все черные дыры превратятся в излучение, и оно вновь станет доминирующим по массе во Вселенной, снова наступит эра излучения. Однако это излучение несравненно более холодное, чем излучение в эпоху распада вещества. Вследствие расширения Вселенной плотность излучения, как уже говорилось, падает быстрее плотности электронно-позитронной плазмы, и через 10^{100} лет станет доминирующей именно эта плазма и, кроме нее, во Вселенной не останется практически ничего.

На первый взгляд картина эволюции Вселенной в отдаленном будущем выглядит весьма пессимистически из-за постепенного распада, деградации, рассеяния.

К возрасту Вселенной 10^{100} лет в мире останутся практически только электроны и позитроны, рассеянные в пространстве с ужасающе ничтожной плотностью: одна частица будет приходиться на объем, равный 10^{185} объемам всей видимой сегодня Вселенной. Означает ли это, что в будущем замрут все процессы, не будет происходить активных движений физических форм материи, невозможно будет существование каких-либо сложных систем, а тем более разума в какой бы то ни было форме?

Нет, такой вывод был бы неверен. Конечно, с нашей

сегодняшней точки зрения все процессы в будущем будут чрезвычайно замедленны, но ведь и пространственные масштабы тогда будут иными. Напомним, что в самом начале расширения Вселенной, когда температура была примерно 10^{27} Кельвинов, происходили процессы рождения вещества, текли бурные реакции, продолжительность которых исчислялась 10^{-34} секунды, а пространственные масштабы были порядка 10^{-24} сантиметра. С точки зрения подобных масштабов и сверхбыстрых процессов сегодняшние события во Вселенной, в том числе и наша жизнь, это нечто невероятно медленное и чрезвычайно растянутое в пространстве. По мнению известного американского физика Дайсона, в любом отдаленном будущем возможны будут сложные формы движения материи и даже разумная жизнь, правда, в непривычных формах, и «пульс жизни будет биться все медленнее, но никогда не остановится».

И звезды умирают во Вселенной...
Огромна ночь.
И только черный ветер
Качает небо с легкой белой птицей...
Она взлетела с маленьких ладоней,
Когда ребенок осознал себя,
И этот мир, и звезды, и столетья...
Рождение и смерть всего на свете. Конечность жизни.
Бесконечность неба.
Несчетны стаи птиц,
Что кружат во Вселенной,
Частицы света в беспредельной бездне.
Огромна ночь.
Пока ребенок спит,
Рождаются галактики и люди,
И звезды умирают в страшных муках.
Пока ребенок спит,
Облитый светом,
Последним светом умершей звезды.
Что остается после человека?
Большая птица
С детскими глазами,
Частица света в ледяном пространстве.

М. Катыс

Наша пытливая мысль залетела в невообразимо далекое

будущее. В таких длительных полетах всегда можно столкнуться с чем-то непредусмотренным. Пока у нас речь шла о процессах, которые вытекают из надежно установленных физических законов, однако в будущем возникнут физические условия, недоступные нам в эксперименте (сверхнизкие температуры, малые плотности и т. д.), и вполне возможно проявление сил, возникновение процессов, совершенно нам пока неизвестных. А эти силы и процессы могут в корне изменить ситуацию.

Вот один из таких возможных процессов — распад вакуума, его превращение в расширяющейся Вселенной в реальное вещество. В прошлом, в упоминавшуюся уже эпоху 10^{-34} секунды после начала расширения, вакуум — «ложный вакуум», как мы его называли, — вероятно, уже распался, порождая частицы и античастицы больших энергий. Эта энергия соответствовала температуре 10^{27} Кельвинов, а плотность вещества составляла 10^{74} г/см^3.

В современном вакууме (в том, что в просторечии называется пустотой), тоже, возможно, заключена некоторая плотность энергии. Но, как мы видели в разделе «Гравитация пустоты», она если и есть, то очень мала и соответствует плотности массы не более чем 10^{-28} г/см^3, а может быть, даже существенно меньше. Обнаружить такую плотность даже в астрономических наблюдениях крайне трудно. Теория полагает возможным, что плотность массы вакуума в далеком будущем скачком перейдет в реальные частицы и античастицы, давая начало новым физическим процессам. Родившееся при этом вещество будет, конечно, разреженным, но все же несравненно более плотным, чем оставшееся к тому времени рассеянное вследствие расширения Вселенной «наше» вещество. Подобный «фазовый переход» вакуума может быть чрезвычайно существенным для

судеб Вселенной. Так, в принципе этот переход может остановить расширение Вселенной и сменить его сжатием. Вновь возникший при этом «сверхистинный вакуум» будет обладать гравитационными свойствами притяжения, а не отталкивания, как «ложный вакуум». Ясно, что если расширение Вселенной сменится сжатием, то при этом вся нарисованная нами картина будущего Вселенной изменится в корне.

И еще одно замечание. Рисуя будущее Вселенной, мы предполагали, что нейтрино мех сортов не обладают массой покоя, то есть представляют собой излучение. Предполагалось также, что эти частицы подобно фотонам имеют массу только потому, что всегда движутся со световой скоростью, а их масса покоя равна нулю. Но, как мы видели в главе «Нейтринная Вселенная», возможно, масса покоя нейтрино не равна нулю.

Влияния этого факта на будущие судьбы Вселенной могут быть двоякого рода. Если масса покоя нейтрино очень мала, скажем, в сотни тысяч раз меньше массы электрона, то тяготение, создаваемое этой частицей в масштабах Вселенной, тоже очень мало и не оказывает сегодня никакого действия на темпы расширения. Однако в отдаленном будущем плотность массы нейтрино будет падать не так быстро, как плотность массы фотонов, а так же, как плотность массы обычных частиц, и в электронно-позитронной плазме будет постоянная малая примесь нейтрино (и антинейтрино), имеющих массу покоя.

Если же окажется, что масса покоя нейтрино близка к предсказываемому верхнему возможному пределу (примерно 0,00005 массы электрона), то суммарная масса всех этих частиц во Вселенной получится чрезвычайно большой, а средняя плотность вещества превысит критическую (10^{-29} г/см^3), и в будущем тяготение нейтрино остановит расширение Вселенной. Это может случиться гораздо раньше, чем распадется все ядерное вещество, и даже раньше, чем погаснут все звезды. Тогда в будущем Вселенную ожидает сжатие, разрушение при этом небесных тел, возникновение вновь сверхплотного сверхгорячего вещества со сверхбурными физическими процессами.

Как видите, в любом возможном сценарии эволюции Вселенной ее будущее представляется захватывающе интересным и многообразным.

Правда, во всех вариантах в отдаленном будущем Вселенная будет совсем не похожа на окружающую нас сегодня. Либо это состояние очень разреженное и холодное, либо очень плотное и горячее.

Ну что же. Мы это должны четко понимать. Вселенная эволюционирует непрерывно. Прошлое ее было весьма

своеобразным и не похожим на настоящее. Будущее также будет весьма отличным от всего, что мы видим сегодня. Надо также четко понимать, что при этом в будущем нет ничего фатально неизбежного для разумной жизни в широком смысле этого слова. За ничтожный (по сравнению с эволюцией Вселенной) период цивилизации человеческая мысль овладела многими тайнами природы, заставила ее законы служить человеку.

Если мы будем достаточно благоразумны, чтобы сберечь жизнь на Земле в нашу эпоху бурных социальных потрясений (а мы в Советском Союзе верим, что так будет, и боремся за это), то трудно вообразить, какого научного могущества мы достигнем через сто, тысячу, миллион, а тем более миллиарды лет. Человек (опять же в широком смысле слова) научится использовать для своего блага все законы эволюции Вселенной, научится управлять ими. Было бы наивно полагать, что Вселенная приготовила на все времена для человечества благодатные «тепличные» условия для существования. «Мы не должны ждать милости от природы. Взять их у нее — наша задача». Эти слова известного естествоиспытателя, — гордые слова, достойные человечества. Конечно, при осуществлении подобных задач в масштабах Вселенной совершенно по-новому обернутся проблемы охраны природы и другие. Но несомненно то, что будущее общество найдет способы их решить.

Подходя к концу нашего повествования, хотим еще раз напомнить, что, конечно же, серьезные изменения во Вселенной (по сравнению с нынешним ее состоянием) во всех случаях могут начаться очень не скоро не только в житейских, но и астрономических масштабах, как минимум через десятки, а может быть, тысячи миллиардов лет. Это во много раз больше нынешнего возраста видимой нами Вселенной, которой никак не больше 10 - 20 миллиардов лет от начала расширения.

Заключение

Не может быть заключения в рассказе о предмете, о котором мы вели речь. Рассказ о вечно эволюционирующей, вечно молодой Вселенной не терпит итогов. Но что все же хочется специально подчеркнуть, так это особенно бурное развитие науки о Вселенной — космологии, приносящей новые удивительные открытия и новые фундаментальные знания. В эту науку сейчас приходит новое молодое поколение ученых, берущихся за решение еще недавно «неразрешимых проблем». Хочется, чтобы они были вооружены не только знанием, но и вдохновением, настоящей влюбленностью в свое дело.

Эврика

ИГОРЬ ДМИТРИЕВИЧ НОВИКОВ

В институте космических исследований АН СССР профессор, доктор физико-математических наук И. Новиков занимается многими проблемами Вселенной. Им проведены важные теоретические исследования черных дыр. Кроме того, он указал на события, протекающие во Вселенной, которые помогли астрофизикам открыть эти черные дыры. И. Новиков — автор многих научно-популярных брошюр и книг, которые неоднократно отмечались на всесоюзных конкурсах на лучшую популярную книгу о науке и переводились на многие иностранные языки. «Черные дыры и Вселенная» — его первая книга в серии «Эврика».

50 коп.

МОЛОДАЯ ГВАРДИЯ